



**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**ANALISA KERAWANAN LONGSOR MENGGUNAKAN  
METODE VLF-EM DI DESA TUGUREJO, KECAMATAN  
SLAHUNG, KABUPATEN PONOROGO**

**MUHAMMAD HUSEIN ALFARITSI**  
**NRP. 01111340000069**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Sungkono, M.Si.**  
**NIP. 19850702 201404.1.002**

**DEPARTEMEN FISIKA**  
**FAKULTAS ILMU ALAM**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA 2018**



**TUGAS AKHIR - SF 141501**

**ANALISA KERAWANAN LONGSOR MENGGUNAKAN  
METODE VLF-EM DI DESA TUGUREJO, KECAMATAN  
SLAHUNG, KABUPATEN PONOROGO**

**MUHAMMAD HUSEIN ALFARITSI  
NRP.0111134000069**

**Dosen Pembimbing  
Dr. Sungkono, M.si.**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS ILMU ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018**



**FINAL PROJECT - SF 141501**

**LANDSLIDE HAZARD ASSESMENT USING VLF-EM  
METHOD IN TUGUREJO VILLAGE, SLAHUNG  
DISTRICT, PONOROGO REGENCY**

**MUHAMMAD HUSEIN ALFARITSI  
NRP. 0111134000069**

**Advisor  
Dr. Sungkono, M.si.**

**PHYSICS DEPARTMENT  
FACULTY OF NATURAL SCIENCES  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2018**

**ANALISA KERAWANAN LONGSOR  
MENGUNAKAN METODE VLF-EM DI DESA  
TUGUREJO, KECAMATAN SLAHUNG,  
KABUPATEN PONOROGO**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi  
Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
Pada  
Bidang Studi Fisika Bumi  
Program Studi S1 Departemen Fisika  
Fakultas Ilmu Alam  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Disusun Oleh :

**MUHAMMAD HUSEIN ALFARITSI**  
**NRP. 01111340000069**

**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS ILMU ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**

**ANALISA KERAWANAN LONGSOR  
MENGUNAKAN METODE VLF-EM DI DESA  
TUGUREJO, KECAMATAN SLAHUNG,  
KABUPATEN PONOROGO**

**TUGAS AKHIR**

Disusun Oleh :

**MUHAMMAD HUSEIN ALFARITSI  
NRP. 01111340000069**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

**Dr. Sungkono, M.Si.**  
**NIP. 19850702 201404.1.002**

.....  
(Pembimbing I)

**Surabaya, 22 Januari 2018**



**ANALISA KERAWANAN LONGSOR  
MENGUNAKAN METODE VLF-EM DI DESA  
TUGUREJO, KECAMATAN SLAHUNG,  
KABUPATEN PONOROGO**

**Nama** : Muhammad Husein Alfaritsi  
**NRP** : 01111340000069  
**Pembimbing** : Dr. Sungkono, M.Si.

***Abstrak***

*Geologi di Desa Tugurejo, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo tersusun atas batuan sisipan batupasir. Karakteristik tanah tersebut memiliki porositas besar, sehingga air di permukaan lebih mudah masuk ke dalam tanah. Untuk mengetahui tingkat kerawanan longsor, diperlukan pemetaan persebaran aliran fluida bawah permukaan tanah. Pada penelitian ini, pemetaan dilakukan menggunakan metode Very Low Frequency (VLF-EM). Hasil dari analisa data VLF-EM, digunakan filter Fraser & Karous-Hjelt serta proses inversi untuk mengetahui nilai resistivitas 2D. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini berupa anomali konduktif dan resistif. Anomali konduktif berkorelasi dengan retakan-retakan yang terdapat di lokasi penelitian dengan nilai resistivitas  $\pm 6$  ohm meter. Nilai resistivitas ini diduga disebabkan oleh adanya batuan yang telah tersaturasi dengan fluida, sehingga memiliki nilai resistivitas rendah. Tanah yang telah tersaturasi fluida ini yang dapat menyebabkan terjadinya bencana tanah longsor.*

***Kata kunci:*** Inversi, Longsor, Resistivitas 2D, Saturasi Fluida.

# **LANDSLIDE HAZARD ASSESMENT USING VLF-EM METHOD IN TUGUREJO VILLAGE, SLAHUNG DISTRICT, PONOROGO REGENCY**

**Name** : Muhammad Husein Alfaritsi  
**NRP** : 01111340000069  
**Supervisor** : Dr. Sungkono, M.Si.

## ***Abstrac***

*Geology in Tugurejo Village, Slahung District, Ponorogo Regency is contain of sandstone. The soil Characteristics has a large porosity, so that water on the surface more easily get into the soil. To determine the level of landslide vulnerability, it is necessary to mapping the spread of fluid flow below the soil surface. In this research, the mapping is done using Very Low Frequency (VLF-EM) method. Results of VLF-EM data analysis, used Fraser & Karous-Hjelt filter and inversion process to find out the value of 2D resistivity. The results obtained from this research are conductive and resistive anomalies. Conductive anomalies correlate with the cracks located at the study site with a resistivity value of  $\pm 6$  ohm meters. This resistivity value is thought to be caused by the presence of rocks that have been saturated with fluid, thus having a low resistivity value. Land that has been saturated this fluid that can cause a landslide disaster.*

***Keywords:*** *Inversion, Landslide, Resistivitas 2D, Water Saturation*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir yang berjudul “Analisa Kerawanan Longsor menggunakan Metode VLF-EM di Desa Tugurejo, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo”.

Dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini, telah banyak daya, upaya, dan perjuangan yang dilakukan oleh penulis. Atas bantuan, dorongan dan juga bimbingan dari berbagai pihak maka akhirnya penulis dapat menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir ini dengan baik. Sehubungan dengan hal tersebut maka pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Sungkono, M.Si., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa tulus memberi motivasi dan ilmu dalam membimbing penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Bagus Jaya Santosa, Dr. Ali Yunus Rohedi, selaku dosen penguji Tugas Akhir.
3. Orang tua penulis Salman Hudiyono, Nikmatus Sholikhah, dan keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan positif untuk penulis.
4. Bapak Dr. rer. nat. Triwikantoro, M.Sc. selaku dosen wali yang senantiasa tulus memberi motivasi dan ilmu dalam membimbing penulis.
5. Bapak Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng, selaku Ketua Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
6. Teman-teman Supernova (Fisika angkatan 2013), atas kekeluargaannya selama ini yang selalu terjalin.
7. Keluarga Ibu Uli (Ibunya Maya 2015) dan keluarga daerah Penelitian yang telah membantu dalam melancarkan Penelitian.
8. Laboran Geofisika Pak Kiswanto yang telah bersedia memberikan ilmu yang berharga dalam pengambilan data.



9. Teman-teman Geofisika yang telah menemani penulis selama di Lab Geofisika.
10. Rekan-rekan seperjuangan yang tergabung dalam Keluarga Besar Himasika ITS, terima kasih atas kebersamaan perjuangan kalian.
11. Semua pihak yang turut membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

Penulis berharap laporan penelitian Tugas Akhir ini nantinya akan dapat berguna dan dapat dimanfaatkan dengan baik sebagai referensi bagi yang membutuhkan serta menjadi sarana pengembangan kemampuan ilmiah bagi semua pihak yang bergerak dalam peningkatan efisiensi arus dan produksi di smelter aluminium.

Surabaya, 22 Desember 2017

Muhammad Husein Alfaritsi  
NRP. 01111340000069

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK .....	v
ABSTRAC .....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
BAB I    PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	2
1.3    Tujuan Penelitian.....	2
1.4    Batasan Masalah .....	2
1.5    Manfaat Penelitian.....	2
1.6    Sistematika Penulisan.....	3
BAB II    TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1    Geologi Regional.....	5
2.2    Longsor .....	6
2.3    Very Low Frequency (VLF-EM) .....	8
2.3.1    Teori VLF-EM .....	10
2.3.2    Medan VLF-EM .....	11
2.4    VLF dan Anomali VLF-R .....	14
2.4.1    E-Polarization.....	14
2.4.2    H-Polarization .....	15
2.5    Inversi VLF-EM .....	16
2.6    Filtering NA-MEMD .....	17
2.7    Filter Fraser.....	19
2.8    Filter Karous-Hjelt.....	20
BAB III    METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1    Tahapan Penelitian .....	21

3.1.1	Studi Literatur .....	22
3.1.2	Survey Awal Pendahuluan .....	22
3.1.3	Akuisi Data VLF-EM .....	23
3.1.4	Pengolahan Data VLF-EM.....	24
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>27</b>
4.1	Analisa Kualitatif.....	27
4.1.1	Filter NA-MEMD.....	27
4.1.2	Filter Fraser dan Karous-Hjelt.....	30
4.2	Analisa Kuantitatif (Inv2DLF) .....	35
4.3	Model 3 Dimensi .....	38
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>43</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>45</b>
	Lampiran 1 .....	47
	Lampiran 2 .....	53
	Lampiran 3 .....	65
	Lampiran 4 .....	71
	BIODATA PENULIS .....	72

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Geologi daerah penelitian .....	5
Gambar 2.2 Distribusi Medan Elektromagnetik.....	10
Gambar 2.3 Medan Elektromagnetik sekunder. ....	11
Gambar 2.4 Medan Elliptical terpolarisasi .....	14
Gambar 2.5 Proses pemisahan IMF.....	19
 Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	21
Gambar 3.2 Kondisi terkini .....	22
Gambar 3.3 Peta geologi daerah penelitian.....	23
Gambar 3.4 Peralatan akusisi data .....	24
 Gambar 4.1 Hubungan antara data <i>inphase</i> dan <i>quadrature</i> sebelum <i>filtering</i> (lintasan 1).....	27
Gambar 4.2 Hasil dekomposisi data Inphase dan Quadrature (lintasan 1).....	28
Gambar 4.3 Data Inphase dan Quadrature setelah <i>filtering</i> menggunakan NA-MEMD pada lintasan 1. Titik merah merupakan posisi <i>zero-crossing</i> antara Inphase dan Quadrature	29
Gambar 4.4 Nilai inphase dan quadrature (a) sebelum dilakukan filter Fraser dan (b) setelah dilakukan filter Fraser pada Lintasan 1. Garis berwarna merah menunjukkan adanya anomali.....	30
Gambar 4.5 Peta kontur 2D dengan parameter rapat arus pada lintasan 1 .....	31
Gambar 4.6 Korelasi hasil filter Fraser, Karous-Hjelt, dan kondisi lapangan penelitian.....	32
Gambar 4.7 Hasil filter Fraser pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan. ....	33
Gambar 4.8 Hasil filter Fraser pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan. ....	33
Gambar 4.9 Hasil filter Karous-Hjelt pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan.....	34
Gambar 4.10 Hasil filter Karous-Hjelt pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan.....	35

Gambar 4.11 Hasil Inversi pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan. ....	37
Gambar 4.12 Hasil Inversi pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan. ....	38
Gambar 4.13 Hasil plot 3D persebaran fluida lokasi penelitian bagian atas .....	39
Gambar 4.14 Hasil plot 3D persebaran fluida lokasi penelitian bagian bawah.....	39
Gambar 4.15 Hasil model 3D dengan sayatan horisontal tiap kedalaman pada bagian atas .....	40
Gambar 4.16 Hasil model 3D dengan sayatan horisontal tiap kedalaman pada bagian bawah .....	41

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Plot data pengukuran <i>inphase quadrature</i> VLF-EM tanpa filter
Lampiran 2	Hasil filter NA-MEMD, <i>Fraser</i> , <i>Karous-Hjelt</i>
Lampiran 3	Hasil inversi 2D bawah permukaan

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***





# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Ponorogo merupakan salah satu Kabupaten di Provinsi Jawa Timur dengan kondisi geologi pada bagian utara adalah gunung Lawu yang termasuk dalam jalur gunungapi kuartar yang masih aktif, sedangkan pada bagian selatan termasuk dalam jalur pegunungan selatan. Dengan kondisi geologi tersebut menyebabkan Kabupaten Ponorogo termasuk dalam Kabupaten dengan tingkat kerawanan bencana tanah longsor yang besar (Bemmelen, 1949). Berdasarkan data BPBD Kab. Ponorogo, tahun ini telah terjadi beberapa tanah longsor sehingga menimbulkan puluhan korban meninggal dunia. Salah satu wilayah yang rawan tanah longsor merupakan Kecamatan Slahung (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2016).

Tanah longsor merupakan proses pergerakan massa tanah dan atau batuan penyusun lereng yang menurun permukaan lereng. Pergerakan tanah tersebut merupakan salah satu proses geologi yang diakibatkan oleh beberapa faktor yang tidak stabil, diantaranya adalah faktor struktur geologi, geomorfologi, tata guna lahan dan hidrogeologi. Ketidakstabilan faktor-faktor tersebut dapat mengakibatkan kondisi lereng yang cenderung bergerak (Sassa, 2015). Salah satu penyebab terjadinya longsor yang sering terjadi yaitu dikarenakan faktor geologi. Daya ikat batuan pada zona patahan sangat rendah, sehingga menimbulkan banyak retakan yang memudahkan air meresap (Surono, 2003). Pada musim penghujan, air akan mudah meresap ke dalam lapisan tanah melalui retakan dan menyebabkan lapisan tanah menjadi jenuh air. Dengan demikian, dapat mengakibatkan terjadinya longsor (Wahyunto, 2007).

Sebagai salah satu bentuk mitigasi bencana, diperlukan identifikasi fluida berupa air yang tersaturasi dalam tanah untuk mengetahui potensi tanah longsor di daerah tersebut. Terdapat banyak metode yang dapat digunakan untuk penelitian ini, namun

sebagian besar membutuhkan waktu dan tenaga yang besar. Salah satu metode geofisika yang mampu mengidentifikasi kadar fluida dalam tanah yang efektif dan ramah lingkungan yakni VLF-EM. Oleh karena itu, digunakan metode geofisika VLF-EM dalam proses penelitian Tugas Akhir ini (Grandis, 2009).

## **1.2 Rumusan Masalah**

Permasalahan yang dapat dirumuskan dalam penelitian Tugas Akhir ini yaitu :

1. Bagaimana mengetahui nilai potensi longsor berupa nilai resistivitas menggunakan metode VLF-EM ?
2. Bagaimana menentukan bidang longsor berbasis data VLF-EM ?
3. Bagaimana menentukan model bawah permukaan daerah potensi longsor dari inversi data VLF-EM ?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian Tugas Akhir antara lain :

1. Mengetahui nilai potensi longsor berupa nilai resistivitas menggunakan metode VLF-EM .
2. Menentukan bidang longsor berbasis data VLF-EM.
3. Menentukan model bawah permukaan daerah potensi longsor dari inversi data VLF-EM.

## **1.4 Batasan Masalah**

Pada penelitian Tugas Akhir ini, permasalahan dibatasi pada :

1. Lokasi dilakukannya penelitian berada di Ds. Tugurejo Kec. Slahung Kab. Ponorogo
2. Penerapan metode VLF-EM untuk menentukan nilai potensi longsor

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian yang berjudul “Analisis Kerawanan Tanah Longsor Menggunakan Metode VLF-EM di Desa Tugurejo, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo” ini berupa gambaran tentang model bawah permukaan 3D serta menentukan bidang longsor dengan mengetahui nilai potensi longsor.

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir tersebut dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan pemerintah dalam upaya mencegah terjadinya tanah longsor. Selain itu juga bisa digunakan sebagai dasar dari penelitian yang lebih spesifik lainnya.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam penelitian Tugas Akhir ini secara garis besar adalah sebagai berikut:

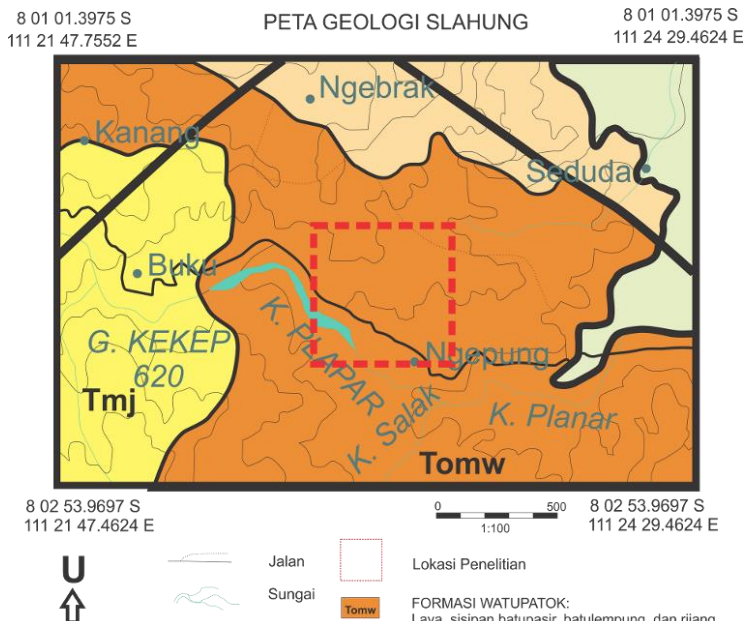
1. BAB I - Pendahuluan  
Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
2. BAB II - Tinjauan Pustaka  
Tinjauan pustaka yang berisis teori dan konsep dasar yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian Tugas Akhir.
3. BAB III - Metode Penelitian  
Metode penelitian meliputi algoritma dan prosedur kerja yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini.
4. BAB IV - Analisa Data Dan Pembahasan  
Menjelaskan hasil-hasil yang telah didapat dari proses pengolahan data penelitian ini.
5. BAB V – Penutup  
Berisi penjelasan tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian ini.
6. Lampiran  
Berisi data-data yang digunakan dalam penelitian beserta gambar maupun tabel yang menunjang penelitian.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Geologi Regional

Lokasi penelitian Tugas Akhir ini terletak di Desa Tugurejo Kecamatan Slahung Kabupaten Ponorogo. Tepatnya pada koordinat  $111^{\circ}21'47.7552''$  -  $111^{\circ}29'29.4624''$  bujur timur dan  $8^{\circ}01'01.3975''$  -  $8^{\circ}02'53.9697''$  lintang selatan. Berdasarkan pada Gambar 2.1, daerah penelitian ini terletak di Formasi Watupatok yang terdiri dari batuan lava, sisipan batupasir, batulempung, dan rijang (Samodra, 1992).



Gambar 2.1 Geologi daerah penelitian (diambil dan digambar ulang dari Samodra, 1992)

Karakteristik batuan di daerah penelitian bersifat batuan lempung. Batuan lempung merupakan batuan sedimen yang bersifat liat atau plastis, tersusun oleh butiran-butiran halus *hidrous aluminium silikat* (mineral lempung) dengan ukuran tidak lebih dari 0,002 mm. Mineral penyusun batu lempung

mengandung banyak silika. Silika ini berasal dari feldspar yang banyak ditemukan di lapisan kulit bumi. Batu lempung juga memiliki susunan unsur oksida besi yaitu siderite, markit atau pirit.

Daerah penelitian ditandai dengan garis putus-putus warna merah (lihat Gambar 2.1) yang berjarak  $\pm 3$  km dengan Sesar Karangrejo. Daerah penelitian ini berupa dataran tinggi dengan elevasi 270 – 330 m diatas permukaan laut.

## 2.2 Longsor

Shi et al., (2016) menjelaskan bahwa longsor merupakan peristiwa pergerakan tanah akibat ketidakstabilan bidang tanah miring. Apabila terjadi ketidakstabilan di sebuah lereng, dapat menyebabkan terjadinya suatu proses mekanis, yakni sebagian dari massa tanah tersebut bergerak menuruni lereng mengikuti arah gaya gravitasi menuju kondisi yang stabil. Jadi longsor merupakan pergerakan massa tanah atau batuan yang menuruni lereng mengikuti arah gaya gravitasi akibat dari ketidakstabilan lereng.

Longsor dapat diklasifikasikan berdasarkan pada mekanisme gerakan dan material yang berpindah dapat dibagi menjadi 6 jenis yaitu: luncuran (*slide*), aliran (*flow*), nendatan (*slump*), jatuhan (*fall*), gerak bentang lateral (*lateral spread*), dan jungkiran (*topple*). Berikut adalah penjelasannya (Varnes, 1978):

1. Luncuran (*slide*) adalah pergerakan massa tanah yang menuruni lereng melalui bidang gelincir pada lereng. Tanda awal terjadinya gerakan luncuran adalah berupa retakan berbentuk lengkung tapal kuda pada permukaan lereng.
2. Runtuhan (*falls*) merupakan runtuhnya sebagian massa batuan pada lereng yang terjal.
3. Pencaran lateral (*lateral spread*) adalah material batuan yang bergerak secara translasi. Biasanya terjadi pada lereng yang tersusun dari tanah lunak yang terbebani oleh massas tanah diatasnya.

4. Robohan (*topples*) merupakan runtuhannya batuan yang bergerak melalui bidang diskontinyu yang tegak pada lereng. Biasanya terjadi pada batuan dengan kelerengan sangat terjal.
5. Nendatan (*slump*) adalah longsoran yang bergerak secara rotasi melalui bidang gelincir lengkung.
6. Aliran (*flows*) adalah aliran massa berupa fluida kental. Dapat dibedakan menjadi dua, yakni aliran tanah (*earth flow*) dan aliran lumpur (*mud flow*). Aliran tanah merupakan pergerakan massa yang didominasi oleh material tanah berukuran butir halus (butir lempung). Sedangkan aliran lumpur didominasi oleh massa yang berisi fluida.

Tanah longsor akan terjadi jika terpenuhi tiga keadaan, yaitu 1) lereng cukup curam, 2) terdapat bidang peluncur (batuan) di bawah permukaan tanah yang kedap air, 3) terdapat cukup air (hujan) yang masuk ke dalam pori-pori tanah di atas lapisan batuan kedap sehingga tekanan tanah terhadap lereng meningkat (Brook *et al.*, 1991).

Faktor penyebab terjadinya gerakan pada lereng tergantung pada kondisi batuan dan tanah penyusun lereng, curah hujan, vegetasi penutup dan penggunaan lahan pada lereng tersebut, namun secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua, yakni faktor alami dan manusia.

a. Faktor Alam

Kondisi alam menjadi salah satu faktor utama penyebab longsor, yaitu:

- Kondisi geologi: lereng yang terjal yang diakibatkan oleh struktur sesar dan kekar (patahan dan lipatan), gempa bumi, stratigrafi dan gunung api, lapisan batuan yang kedap air miring ke lereng yang berfungsi sebagai bidang longsoran, adanya retakan karena proses alam (gempa bumi, tektonik).
- Keadaan tanah: erosi dan pengikisan, adanya daerah longsoran lama, ketebalan tanah pelapukan bersifat lembek, tanah jenuh karena hujan.



- Iklim: curah hujan yang tinggi.
- Keadaan topografi: lereng yang terjal.
- Tutupan lahan yang mengurangi tahan geser, misal lahan kosong.

b. Faktor Manusia

Tanah longsor bisa juga terjadi akibat dari ulah manusia, diantaranya adalah:

- Penggundulan hutan menjadi lahan basah.
- Budidaya kolam ikan dan genangan air di atas lereng.
- Pemotongan tebing di lereng yang terjal.
- Sistem pertanian yang tidak memperhatikan irigasi yang aman.
- Pengembangan wilayah tanpa mematuhi aturan pemerintah.
- Sistem drainase yang buruk (Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2005).

Dari penjelasan penyebab terjadinya longsor tersebut, salah satu faktor penyebab longsor yang sering terjadi adalah faktor struktur geologi. Wilayah yang termasuk dalam zona patahan, memiliki daya ikat tanah yang lemah. apabila terjadi suatu gerakan kecil, seperti gempa bumi atau gerakan yang dihasilkan dari aktivitas manusia, mengakibatkan terjadinya retakan tanah di wilayah tersebut. Pada saat musim penghujan, air hujan akan lebih mudah meresap kedalam tanah melalui beberapa celah retakan yang ada di wilayah tersebut. Semakin besar debit volume air hujan yang memasuki retakan, dapat menyebabkan lapisan tanah menjadi semakin cepat jenuh. Hal demikian cepat atau lambat dapat mengakibatkan terjadinya longsor atau gerakan tanah (Wahyunto, 2007).

### **2.3 Very Low Frequency (VLF-EM)**

VLF-EM merupakan salah satu metode geofisika yang dapat mengetahui nilai resistivitas di bawah permukaan tanah. Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan memanfaatkan medan elektromagnetik yang dipancarkan oleh pemancar radio yang

biasanya digunakan untuk kepentingan navigasi kapal selam. Medan elektromagnetik yang digunakan berfrekuensi sangat rendah antara 15 kHz hingga 30 kHz dengan daya yang sangat besar (Sharma *et al.*, 2014). Menurut Hunsucker (2009), perambatan medan elektromagnetik pada metode VLF-EM mengalami difraksi dalam hambatan yang besar dan dapat mengalami penyebaran sebagai gelombang *ground* mengikuti bentukan dari bumi. Antena pemancar biasanya memiliki ketinggian sekitar 200 hingga 300 meter dengan daya pancar sebagai berikut (Watts, 1978):

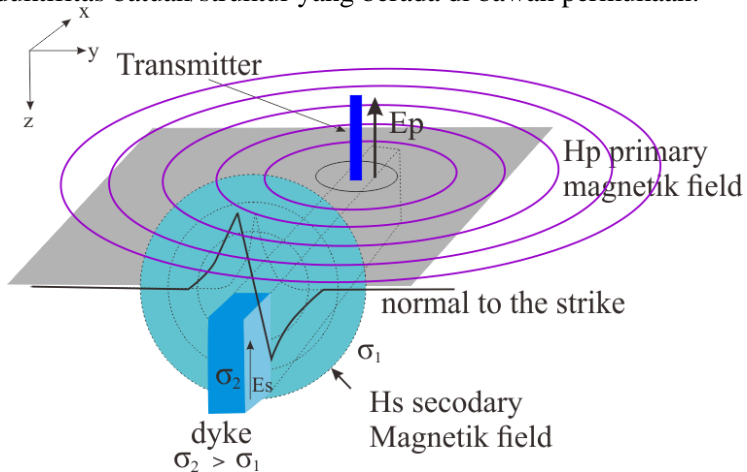
$$P = 7 \times 10^{-13} V^2 C^2 h_e^2 f^4 \quad (2.1)$$

Variabel  $V$  merupakan tegangan yang melalui antena,  $C$  merupakan kapasitansi antena,  $h_e$  ialah ketinggian efektif antena atau dapat didekati dengan ketinggian  $h$  sebenarnya, sedangkan  $f$  adalah frekuensi yang dioperasikan.

Prinsip pengukuran pada metode VLF yaitu dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik primer yang dirambatkan di antara permukaan bumi dan ionosfer. Karena adanya induksi gelombang tersebut, maka komponen medan magnet dari gelombang elektromagnetik primer akan menginduksi batuan yang konduktif sebagai medium. Hasilnya menimbulkan arus induksi yang disebut dengan *Eddy Current* (Indriyani, 2014).

Pada Gambar 2.2 menunjukkan bahwa pemancar radio yang berfungsi sebagai *transmitter*, mampu memancarkan gelombang elektromagnetik yang disebut sebagai medan elektromagnetik primer. Komponen medan elektromagnetik primer yakni medan listrik  $E_p$  dan medan magnetik horisontal  $H_p$  yang tegak lurus terhadap arah perambatan sumbu  $x$ . Apabila jarak sebuah anomali yang bersifat konduktif cukup jauh dengan antena pemancar, maka komponen medan elektromagnetik primer  $H_{py}$  dianggap sebagai gelombang berjalan secara horisontal. Ketika medan elektromagnetik primer  $H_{py}$  melewati batuan/struktur yang bersifat konduktif, akan menginduksi batuan/struktur tersebut sehingga akan menimbulkan arus induksi (*Eddy Current*). Arus

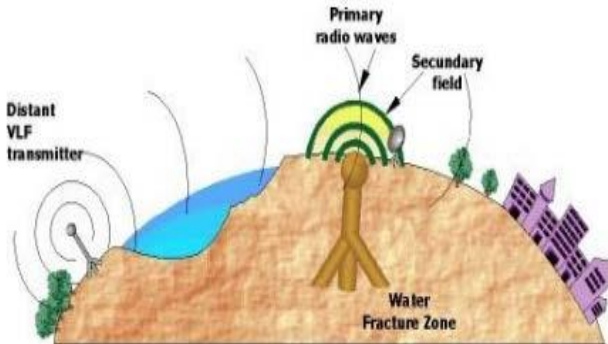
Eddy ini juga disebut dengan medan elektromagnetik sekunder  $H_s$ , yang mempunyai bagian sefase (*inphase*) dan berbeda fase (*quadrature*) dengan medan primer. Menurut Indriyani (2014), besar medan elektromagnetik sekunder tergantung dari sifat konduktifitas batuan/struktur yang berada di bawah permukaan.



Gambar 2.2 Distribusi Medan Elektromagnetik untuk metode VLF dalam polarisasi listrik dengan sinyal diatas sebuah dike konduktif vertikal (diambil dan digambar ulang dari (diambil dan digambar ulang dari Wijaya, 2014).

### 2.3.1 Teori VLF-EM

Metode VLF EM memanfaatkan gelombang yang biasanya digunakan sebagai alat navigasi kapal selam. Gelombang tersebut dipancarkan dari radio pemancar di Yosamai, Jepang dan Northwest Cape, Australia dengan frekuensi sangat rendah antara 15-30 kHz. Antena radio pemancar memancarkan sinyal berupa gelombang primer. Ketika gelombang primer masuk ke dalam suatu sistem perlapisan tanah yang konduktif, maka lapisan tersebut menghasilkan sumber medan magnet sekunder. Karakteristik kelistrikan pelapisan tanah dapat ditentukan dengan cara membandingkan medan magnet sekunder dan medan magnet primer (Telford, 1990).



Gambar 2.3 Medan Elektromagnetik sekunder yang dihasilkan dari induksi radiasi gelombang VLF.

Gelombang elektromagnetik pada metode VLF-EM dapat dijelaskan secara fisis seperti pada Gambar 2.3. Data yang diperoleh pada saat pengukuran VLF-EM merupakan gabungan dari medan magnet primer dengan medan magnet sekunder sesuai dengan karakteristik geologi wilayah penelitian (West, 1965).

### 2.3.2 Medan VLF-EM

Perambatan gelombang elektromagnetik memiliki hubungan dengan vektor medan listrik dan medan magnetik yang dapat dijelaskan oleh Persamaan Maxwell sebagaimana pada Persamaan 2.2, yakni:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2b)$$

Variabel  $E$  pada Persamaan (2.2) merupakan medan listrik (V/m), variabel  $B$  ialah induksi elektromagnetik ( $\text{Wb/m}^2$ ),  $t$  merupakan waktu (detik),  $H$  merupakan medan magnetik (A/m), dan  $D$  merupakan pergeseran listrik (C/m). Persamaan Maxwell menjelaskan bahwa medan elektromagnetik yang merambat pada konduktivitas  $\sigma$ , permitivitas dielektrik  $\epsilon$ , dan permeabilitas  $\mu$

dapat dituliskan dalam domain frekuensi sebagaimana pada persamaan 2.3 hingga 2.6:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon i \omega \mathbf{E} = (\sigma + \varepsilon i \omega) \mathbf{E} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 i \omega \mathbf{H} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = q \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.6)$$

$\mathbf{E}e^{i\omega t}$  menunjukkan vektor medan listrik, sedangkan  $\mathbf{H}e^{i\omega t}$  melambangkan vektor medan magnet. Variabel  $t$ ,  $\omega$ , dan  $q$  secara berturut-turut merepresentasikan waktu, frekuensi sudut, dan densitas muatan (Kalscheur et. al., 2008). Pada kasus 3D, Persamaan (2.3) dan (2.4) dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) i + \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) j + \left( \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right) k \\ = (\sigma + \varepsilon i \omega) (E_x i + E_y j + E_z k) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dan medan magnet

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) i + \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) j + \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) k \\ = -i\omega\mu(H_x i + H_y j + H_z k) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Gelombang datar atau yang disebut dengan gelombang horisontal diasumsikan sebagai gelombang yang sejajar terhadap permukaan bumi pada bidang  $y$ - $z$  dengan arah sumbu  $z$ . Dengan demikian, komponen medan elektromagnetik dan admivitas  $(\sigma + \varepsilon i \omega)$  tidak berubah pada arah  $x$  dan hanya bervariasi pada arah  $y$  dan  $z$ . Sesuai dengan definisi *Transverse Electric* (TE) dan *Transverse Magnetic* (TM), komponen vertikal medan listrik dan magnetik menjadi hilang (Ghufron, 2010; Sengupta, 2014). Oleh

karena itu, bentuk 2D ( $\partial / \partial x = 0$ ) dari Persamaan (2.7) dan (2.8) dapat dijabarkan sebagaimana berikut:

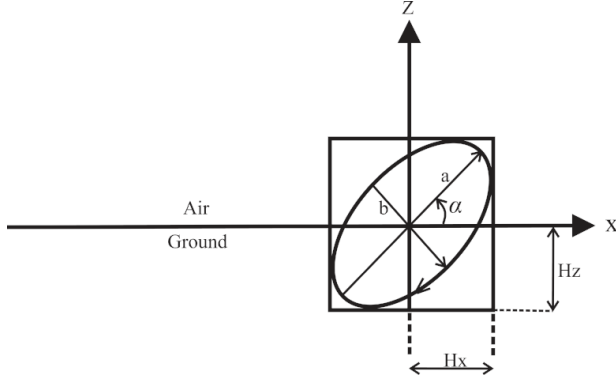
- *TE Mode*

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\mu i \omega H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= -i \omega \mu H_y \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i \omega \mu H_z\end{aligned}\tag{2.9}$$

- *TM Mode*

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= (\sigma + i \omega \epsilon) E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} &= (\sigma + i \omega \epsilon) E_y \\ \frac{\partial H_x}{\partial y} &= (\sigma + i \omega \epsilon) E_z\end{aligned}\tag{2.10}$$

Output pada alat VLF adalah data triper (Hz/Hy) berupa bilangan kompleks akibat dari polarisasi antara komponen Hz dan Hy, sehingga alat VLF hanya menggunakan penjalaran gelombang pada TE mode saja. Bentuk polarisasi tergantung pada besarnya Hz dan Hy. Apabila besarnya nilai Hz dan Hy tidak sama, maka polarisasi berbentuk *ellips*, jika nilai Hz dan Hy sama, maka berbentuk lingkaran (Gambar 2.4). Data triper memiliki dua bagian, yakni *real* dan *imaginer*, masing-masing disebut dengan *inphase* dan *quadrature* (Kalscheuer et. al., 2008). Metode VLF cocok untuk interpretasi secara lateral, dikarenakan data triper sangat efektif dalam pencitraan beda konduktivitas secara lateral, namun kurang bagus untuk pencitraan konduktivitas secara vertikal (Sengupta, 2014; Simpson and Bahr, 2005).



Gambar 2.4 Medan *Elliptical* terpolarisasi (Singh and Sharma, 2016)

## 2.4 VLF dan Anomali VLF-R

### 2.4.1 E-Polarization

Bentuk *ellips* hasil polarisasi dari  $H_z$  dan  $H_y$  dipengaruhi oleh dua parameter fisis, yakni *tilt angle* ( $\alpha$ ) dan elipsitas ( $\varepsilon$ ). *Tilt angle* merupakan sudut dari sumbu utama terhadap bentuk polarisasi *ellips*. Sedangkan elipsitas ialah rasio sumbu mayor dan minor *ellips*. Hubungan antara  $H_y$  dan  $H_z$  dengan  $\alpha$  dan  $\varepsilon$  dapat dideskripsikan sebagaimana berikut:

$$\tan \alpha = \pm \frac{2 \left( \frac{H_z}{H_y} \right) \cos \Delta \phi}{1 - \left( \frac{H_z}{H_y} \right)^2} \quad (2.11)$$

$$e = \frac{H_z H_y \sin \Delta \phi}{H_1^2} \quad (2.12)$$

$H_y$  dan  $H_z$  adalah komponen medan magnetik horisontal dan vertikal,  $\phi_z$  dan  $\phi_y$  masing-masing adalah komponen sudut medan magnetik vertikal dan horizontal, sedangkan  $\Delta \phi = \phi_z - \phi_y$

merupakan beda sudut antara  $\phi_z$  dan  $\phi_y$ . Nilai tangen dari *tilt angle* dan  $e$  bagus untuk menjelaskan rasio komponen vertikal dari medan magnet sekunder terhadap medan magnet primer (Alatorre-Zamora et al., 2014; Gurer et al., 2009; Sengupta, 2014).

### 2.4.2 H-Polarization

Nilai *real* dan *imaginary* pada anomali VLF bernilai nol saat mode H-Polarisasi. Peletakan posisi *transmitter* VLF terhadap geologi sama dengan pengukuran pada medan listrik, yaitu tegak lurus dengan arah geologinya. Persamaan resistivitas semu dan fase dapat dideskripsikan sebagai berikut:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.13)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{\text{Im} \left( \frac{E_x}{H_y} \right)}{\text{Re} \left( \frac{E_x}{H_y} \right)} \right] \quad (2.14)$$

Berdasarkan pada teori komputasi, komponen medan  $E_x$  dan  $E_y$  diperoleh dari penerapan *finite element* dengan menggunakan proses Galerkin pada Persamaan Maxwell. Sedangkan untuk komponen yang lainnya menggunakan diferensial numerik Persamaan Maxwell (Gürer et al., 2009; Sengupta, 2014).

Jangkauan kedalaman yang dapat dicapai medan VLF-EM pada medium konduktif dapat diketahui dengan menggunakan faktor *skin depth* (ditentukan berdasarkan kondisi lingkungan lokasi penelitian) sebagaimana terdapat pada persamaan 2.15:

$$d = (2\rho / \omega\mu_0)^{1/2} \approx 503(\rho / f)^{1/2} \quad (2.15)$$

dengan  $d$  merupakan *skin depth*,  $\rho$  merupakan resistivitas medium,  $\omega$  merupakan frekuensi angular,  $\mu_0$  merupakan



permeabilitas pada ruang hampa, dan  $f$  merupakan frekuensi dari transmitter yang terekam.

## 2.5 Inversi VLF-EM

Salah satu cara untuk melakukan interpretasi data kuantitatif VLF adalah dengan menggunakan proses inversi. Inversi merupakan proses pengolahan data lapangan hasil penelitian secara matematis untuk mendapatkan informasi dalam mengetahui distribusi sifat fisis bawah permukaan (Menke, 1984). Dalam proses inversi diperlukan parameter fisis yang berhubungan dengan nilai resistivitas batuan, yakni resistivitas semua dan fase TE. Namun sebelum itu, bentuk analog dari parameter fisis tersebut terlebih dahulu diubah menjadi diskrit (Ghufron, 2010). Persamaan dalam proses inversi VLF-EM secara umum dapat dideskripsikan sebagaimana pada Persamaan 2.16:

$$\Delta d = A \cdot \Delta m \quad (2.16)$$

$\Delta d$  adalah perbedaan nilai antara parameter model dengan data observasi,  $\Delta m$  merupakan selisih dari model  $m^k$  dengan model  $m^{k+1}$  resistivitas batuan (Sasaki, 2001). Dalam proses inversi, diperlukan proses iterasi sebagaimana pada Persamaan 2.17,

$$U = \|W_d (G \Delta m - \Delta d)\|^2 + \lambda \left[ \|C_m^{k+1}\|^2 + \alpha \|W_d (m^{k+1} - m_b)\|^2 \right] \quad (2.17)$$

$W_d$  merupakan matriks pembobot yang terdiri dari data standar deviasi atau data amplitud apabila dianggap presentasinya sama dengan standar deviasi.  $C$  didefinisikan sebagai model penghalus.

$W_m$  merupakan matriks pembobot diagonal yang digunakan untuk mengurangi matriks identitas. Untuk mengurangi nilai error, diperlukan sebuah syarat, yakni  $\frac{\partial U}{\partial \Delta m} = 0$ , sehingga diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \left( A^T W_d^T W_d A + \lambda C^T C + \lambda \alpha W_m^T W_m \right) \Delta m = \\ & A^T W_d^T W_d \Delta d - \lambda C^T C m^{(k)} + \lambda \alpha W_m^T W_m \left( m_b - m^{(k)} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$A = \begin{bmatrix} W_d A \\ \sqrt{\lambda C} \\ \sqrt{\lambda \alpha W_m} \end{bmatrix}, \Delta d = \begin{bmatrix} W_d \Delta d \\ -\sqrt{\lambda C} m^{(k)} \\ \sqrt{\lambda \alpha W_m} \left( m_b - m^{(k)} \right) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Bentuk awal dari solusi *least square* terlihat pada Persamaan 2.17. Sedangkan Persamaan 2.18 merupakan bentuk numerik dari persamaan normal. Untuk mendapatkan hasil yang baik, maka persamaan tersebut memerlukan iterasi, iterasi akan berhenti bekerja ketika nilai *misfit* telah sesuai. Untuk menentukan *Root Mean Square* (RMS) dari suatu *misfit* ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.20:

$$S = \sqrt{\Delta d^T W_d^T W_d \Delta d / N} \quad (2.20)$$

Variabel N mendeskripsikan jumlah data yang diiterasi pada proses inversi tersebut.

## 2.6 Filtering NA-MEMD

Noise memiliki pengaruh yang besar terhadap data pengukuran VLF-EM. Salah satu noise yang sangat berpengaruh terhadap proses pengukuran VLF-EM adalah medan elektromagnetik petir dan radiasi sinar matahari (Wijaya, 2014). Selain itu, juga terdapat sumber noise yang berasal dari perangkat elektronik, seperti telepon genggam, TV, radio, dan perangkat lainnya. Untuk membersihkan data VLF-EM dari noise, diperlukan proses filtering. Terdapat banyak cara untuk filtering, yakni Filter Fraser, Filter Karous Hjelt, dan NA-MEMD. Pada proses filtering digunakan filter Fraser dan Karous Hjelt terlebih dahulu, dikarenakan kedua filter tersebut mampu mereduksi noise yang bersifat nonlinear dan non stasioner (Sungkono et al., 2014).

Data VLF-EM bisa disebut sebagai bivariate, dikarenakan data tersebut terdiri dari inphase (real) dan quadrature (imajiner) (Sungkono et al., 2015). Filter *Noise Assisted-Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA-MEMD) merupakan salah satu metode *nonlinear* untuk mereduksi dan mendekomposisi noise pada data VLF-EM. Biasanya digunakan pada data yang bersifat multivariate (terdiri lebih dari satu sinyal). Metode NA-MEMD memiliki keunggulan dalam analisis data yang *multivariate*, yakni data dipisah menjadi beberapa *Intrinsic Mode Function* (IMF), sehingga dapat dideskripsikan sebagaimana berikut (Rehman and Mandic, 2010; Sungkono et al., 2014a):

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (2.21)$$

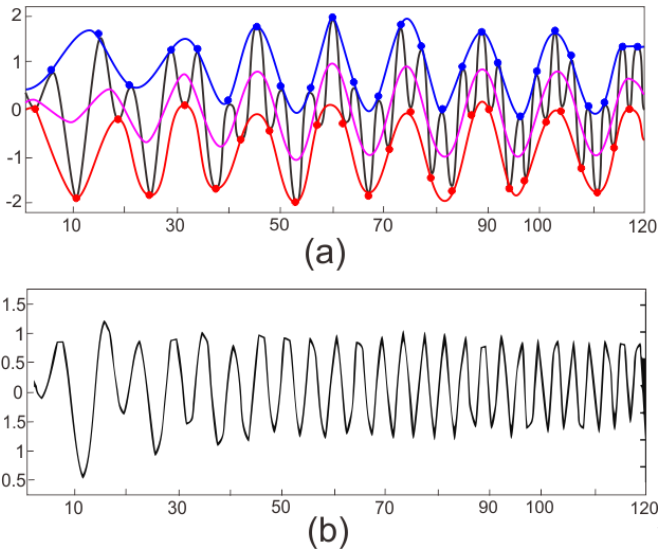
$x(t)$  mendeskripsikan sinyal input yang dibutuhkan dalam proses pemisahan IMF. Pada Gambar 2.5 (a) menunjukkan proses interpolasi dari nilai rata-rata antara puncak atas dan bawah sehingga dapat menghasilkan nilai  $m_1$ . Sedangkan pada Gambar 2.5 (b) menghasilkan nilai  $h_1$  yang berasal dari pengurangan sinyal input dengan nilai rata-ratanya. Nilai  $h_1$  harus memenuhi syarat dari sifat-sifat IMF. Terdapat 2 sifat IMF yakni ketika nilai *extrema* tidak sama dengan nilai *zero crossing*, dan yang kedua yaitu  $m_1$  bernilai nol. Jika kedua sifat IMF tersebut belum terpenuhi, maka dilakukan pengulangan hingga mendapatkan nilai  $h_{11}$  sebagaimana berikut ini:

$$h_{11} = h_1 - m_{11} \quad (2.22)$$

$$h_{11} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (2.23)$$

$$c_1 = h_{1k} \quad (2.24)$$

Untuk memenuhi persyaratan IMF, maka diperlukan pengulangan untuk mendapatkan nilai  $h_{1k}$  sebagaimana pada Persamaan (2.22) hingga (2.24).  $c_1$  merupakan nilai hasil pemisahan IMF pertama. Selanjutnya dilakukan proses yang sama untuk mendapatkan nilai IMF<sub>n</sub>. Hasil akhir dari filter NA-MEMD didapatkan dari proses penjumlahan beberapa data IMF yang bebas dari noise.



Gambar 2.5 Proses pemisahan IMF (a) penentuan nilai rata-rata ( $m_1$  berwarna merah muda) (b) hasil pengurangan sinyal dengan nilai  $m_1$ . (diambil dan digambar ulang dari Flandrin, 2003)

## 2.7 Filter Fraser

Anomali data VLF-EM ditunjukkan adanya *zero-crossing* antara data *quadrature* dan *inphase*. Prinsip dari *filter* Fraser ini adalah dengan membagi data *tilt angle* sebesar  $90^\circ$ . Anomali ditunjukkan oleh puncak atau lembah dari *inphase* dan *quadrature*. Filter ini juga mampu mengurangi panjang gelombang yang terlalu besar untuk meminimalkan efek drift. Filter Fraser diperoleh dari Persamaan (2.25):

$$F_n = (M_{n+2} + M_{n+3}) - (M_n + M_{n+1}) \quad (2.25)$$

Dengan  $M_{n+2}$ ,  $M_{n+3}$ , dan seterusnya merupakan data yang terukur (baik data real atau imajiner) dengan interval waktu  $\Delta x \cdot F_n$  yang telah terfilter. Hasil yang diperoleh dari filter ini dapat digunakan untuk menentukan posisi anomali (Gürer et al., 2009; Sengupta, 2014).

## 2.8 Filter Karous-Hjelt

Filter Karous-Hjelt merupakan teknik filtering yang digunakan untuk menghitung *equivalent* rapat arus yang dihasilkan medan magnet primer dengan medan yang terukur (Sharma et al., 2014). Filter ini ditentukan dari konsep teori linear untuk menyelesaikan permasalahan integral atas distribusi arus. Sehingga filter ini dapat menghasilkan variasi rapat arus di setiap kedalaman yang diturunkan dari komponen vertikal medan magnetik di setiap titik pengukuran (Sengupta, 2014). Pengolahan data menggunakan Karous-Hjelt sesuai dengan persamaan berikut ini :

$$\frac{\Delta z}{2\pi} I_a(0) = -0.102M_{n-3} + 0.059M_{n-2} - 0.561M_{n-1} + 0.561M_{n+1} - 0.059M_{n+2} + 0.102M_{n+3} \quad (2.26)$$

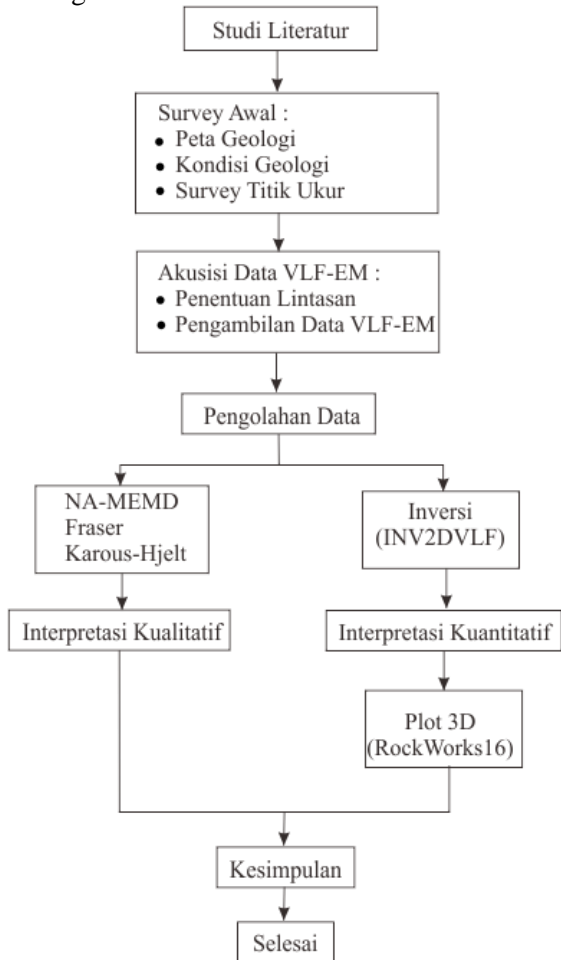
Dengan  $I_a(0) = 0.5 \left[ I\left(\frac{\Delta x}{2}\right) + I\left(-\frac{\Delta x}{2}\right) \right]$  nilainya ekivalen dengan nilai rapat arus. Filter ini berguna untuk mengkorelasikan nilai rapat arus dengan fungsi kedalaman. Persamaan (2.26) menunjukkan bahwa jarak spasi antar titik berpengaruh terhadap ketebalan lapisan bumi yang dapat dijangkau oleh arus. Posisi rapat arus dapat digunakan sebagai parameter dalam menginterpretasi lebar dan kemiringan suatu benda anomali dengan kedalaman tertentu (Gürer et al., 2009; Sengupta, 2014).

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Tahapan Penelitian**

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini, dapat ditampilkan sebagaimana Gambar 3.1:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Pada Gambar 3.1 ini dijelaskan dengan uraian sebagai berikut

### 3.1.1 Studi Literatur

Langkah awal yang harus dilakukan sebelum melakukan penelitian yaitu studi literatur. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan informasi dan referensi terkait tema penelitian. Referensi yang diperlukan dalam penelitian ini, antara lain: geologi regional daerah penelitian, metode VLF-EM, filter NA-MEMD, filter Fraser, filter Karous-Hjelt, dan inversi data menggunakan *software* Inv2DVLF.

### 3.1.2 Survey Awal Pendahuluan

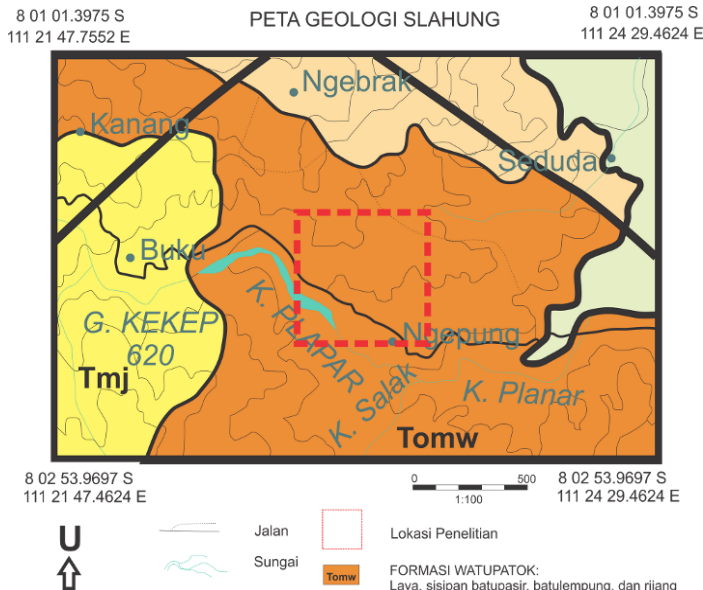
Survey awal pendahuluan bertujuan untuk mengetahui susunan formasi dan kondisi terkini daerah penelitian tersebut sebagaimana terlihat pada Gambar 3.2. Penelitian ini dilakukan di Desa Tugurejo, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo, tepatnya terletak di koordinat pada  $8^{\circ}02'07.04''\text{S}$  dan  $111^{\circ}23'22.41''\text{E}$ . Lokasi penelitian ini termasuk dalam Formasi Watupatok sebagaimana pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Kondisi terkini (a) bagian bawah area pengukuran (Jalan raya) (b) bagian atas area pengukuran

Peralatan yang diperlukan dalam tahap survey awal pendahuluan, antara lain: kompas, GPS, dan perlengkapan dokumentasi. Kompas digunakan untuk mengetahui arah retakan longsor. GPS digunakan untuk mengetahui titik koordinat retakan dan titik pengukuran, selain itu juga untuk mengetahui jarak pengukuran yang akan dilakukan. Dokumentasi berguna untuk

mengabadikan penampang retakan yang ada di daerah penelitian. Setelah diketahui kondisi terkini di lapangan, dapat dilakukan desain pengukuran. Desain pengukuran meliputi jumlah dan arah lintasan, panjang lintasan, jumlah titik pengukuran setiap lintasan, jarak antar lintasan, dan data yang terukur.



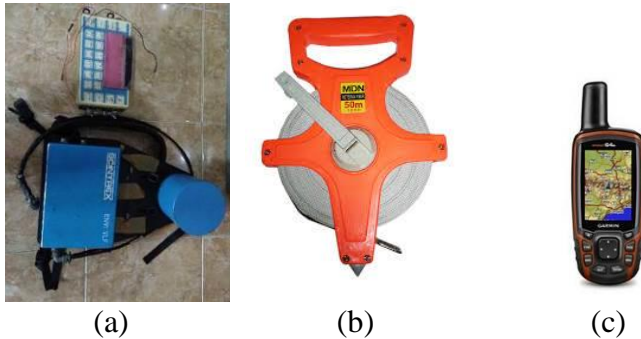
Gambar 3.3 Peta geologi daerah penelitian

### 3.1.3 Akusisi Data VLF-EM

Perlengkapan yang digunakan dalam melakukan akuisisi data sebagaimana pada Gambar 3.4 yang terdiri dari satu set alat ukur VLF-EM, meteran, dan (Global Positioning System) GPS.

Pada saat pengukuran di lapangan, langkah pertama yang harus dilakukan adalah scanning stasiun VLF-EM, dengan syarat antena harus selalu menghadap ke arah Utara. Dalam pencarian stasiun, frekuensi yang diterima oleh alat console VLF-EM haruslah antara 15-30 kHz, setelah itu dicatat frekuensi 1 hingga frekuensi 3.





Gambar 3.4 Peralatan akusisi data berupa (a) satu set VLF-EM Envy Scintrex, (b) meteran, (c) GPS Garmin

Langkah kedua, dilakukan perekaman data VLF-EM. Data yang terekam pada alat VLF salah satunya berupa data Inphase dan Quadrature. Pada setiap titik pengukuran sebisa mungkin dilakukan pengulangan, agar nilai yang terbaca pada alat tidak jauh berbeda di setiap titik pengukuran. Apabila masih terdapat nilai yang range-nya terlalu jauh dari titik sebelumnya, kemungkinan terdapat anomali yang berada pada sekitar titik tersebut seperti adanya sungai, retakan, dan adanya instalasi listrik.

### 3.1.4 Pengolahan Data VLF-EM

Data asli yang diperoleh pada saat proses akusisi data di lapangan masih terpengaruh dengan adanya *noise*. Terdapat beberapa penyebab adanya *noise*, antara lain: petir, radiasi matahari, medan EM, dan *noise* yang disebabkan oleh sifat geologi di lokasi penelitian. *Noise* tersebut menyebabkan sinyal yang ditangkap alat VLF menjadi terganggu. Oleh karena itu diperlukan filter yang berfungsi untuk menghilangkan *noise* yakni dengan menggunakan filter NA-MEMD. Proses *filtering* menggunakan perangkat lunak Matlab 2009. Setelah dilakukan *filtering*, data yang diperoleh dari pengukuran diharapkan dapat menggambarkan anomali yang sebenarnya.

Data hasil pengukuran VLF-EM terdapat komponen *inphase* (real) dan *quadrature*. Kedua komponen tersebut diperlukan untuk interpretasi kualitatif menggunakan filter Fraser dan filter Karous-Hjelt. Lokasi zona konduktif (lateral) dan resistif dapat ditentukan dengan menggunakan kedua filter tersebut, yaitu dengan mengamati *zero-crossing* dari komponen *inphase* dan *quadrature* data VLF-EM.

Pada tahap interpretasi kuantitatif ini dilakukan proses inversi menggunakan perangkat lunak Inv2DLF. Namun sebelum itu, diperlukan pengamatan terlebih dahulu tentang hasil filter Fraser dan filter Karous-Hjelt, selanjutnya dilakukan pencocokan dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Setelah kedua parameter tersebut telah sesuai, dilakukan proses inversi untuk mendapatkan model penampang lapisan bawah permukaan secara kuantitatif. Prinsip dari Inv2DLF adalah melakukan pemodelan ke belakang (*inverse modelling*) dengan memanfaatkan data *inphase* dan *quadrature* untuk mendapatkan model resistivitas 2-D. Pada penelitian ini, untuk mendapatkan model penampang secara 3-D, digunakan *software* Rockwork 3D.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## BAB IV

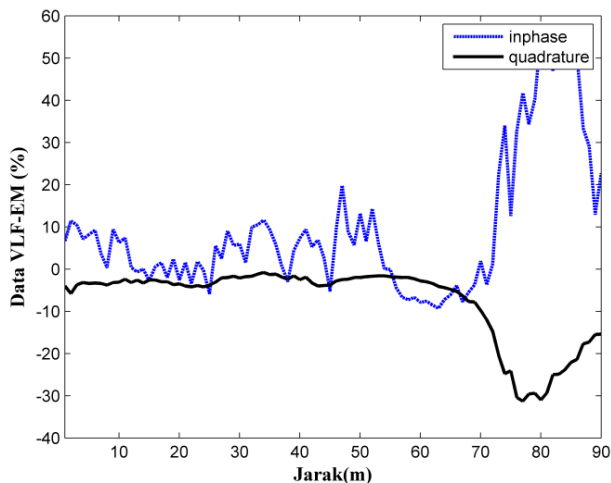
### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, akan dijelaskan mengenai hasil interpretasi data VLF-EM secara kualitatif dan kuantitatif. Selain itu juga akan dibahas mengenai setiap langkah dari hasil Analisa data yang didapatkan. Hasil analisa tersebut akan dikaitkan dengan karakteristik tanah dan kestabilan lereng.

#### 4.1 Analisa Kualitatif

##### 4.1.1 Filter NA-MEMD

Salah satu fungsi filter *Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition (NA-MEMD)* adalah untuk memisahkan sinyal multivariate menjadi beberapa *mode*. Pengukuran VLF-EM menghasilkan data berupa parameter *real (inphase)* dan *imaginer (quadrature)*.

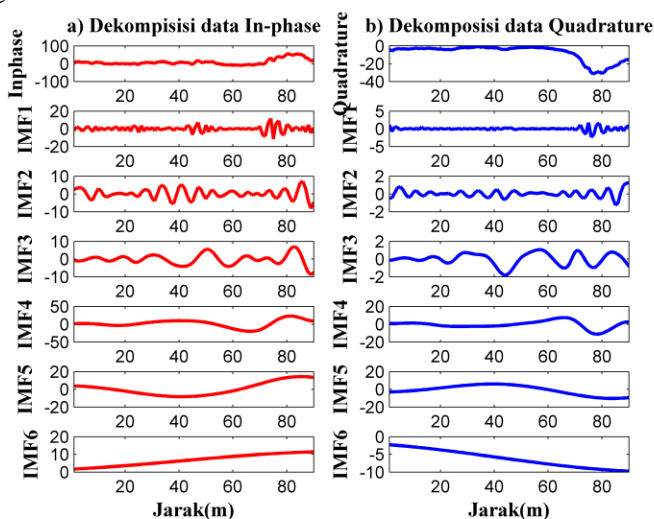


Gambar 4.1 Hubungan antara data *inphase* dan *quadrature* sebelum *filtering* (lintasan 1)

Anomali diidentifikasi dengan adanya grafik *inphase* dan *quadrature* yang mengalami persilangan atau yang disebut juga

dengan *zero crossing*. Sebagai contoh, Gambar 4.1 menunjukkan adanya persilangan pada titik pengukuran 70 meter. Padahal pada titik pengukuran 40-45 meter terdapat retakan tanah yang diharapkan pada titik tersebut terdapat anomali. Hal ini dapat dikategorikan sebagai noise yang diakibatkan dari kondisi geologi daerah penelitian. Noise tersebut seringkali menimbulkan kesalahan dalam interpretasi data, sehingga diperlukan *filtering* menggunakan filter NA-MEMD pada data VLF-EM tersebut untuk mendapatkan interpretasi yang lebih akurat.

Filter tersebut digunakan untuk mereduksi *noise* dengan menerapkan prinsip dari IMF. Terdapat dua syarat yang harus dipenuhi. Pertama, nilai *extrema* tidak sama dengan nilai *zero-crossing*. Kedua, nilai rata-rata *minima* dan *maxima* tidak sama dengan nol.

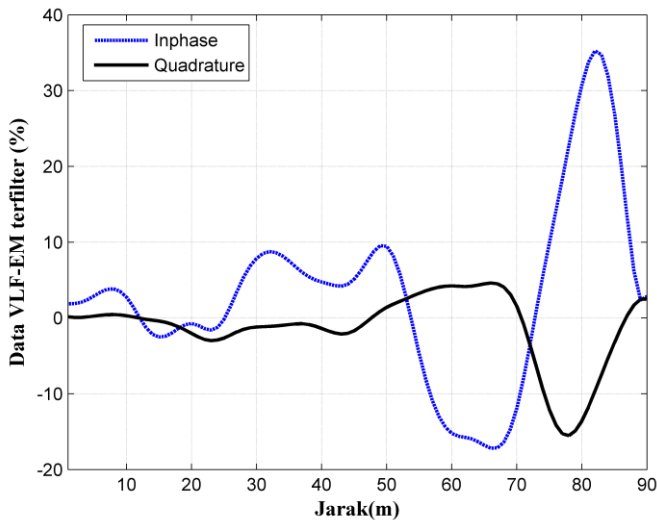


Gambar 4.2 Hasil dekomposisi data Inphase dan Quadrature (lintasan 1)

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa data Inphase dan Quadrature terdekomposisi menjadi IMF1-IMF6. IMF1 memiliki bilangan gelombang lebih besar dibanding dengan IMF

selanjutnya, hal ini dikarenakan data tersebut masih terkontaminasi oleh *noise*.

Sedangkan untuk IMF6 merupakan nilai residu yang menyebabkan terjadinya efek *drift*. Pada proses pemilihan IMF, data yang dipilih adalah sinyal yang tidak memiliki bilangan gelombang tinggi dan *efek drift*, yaitu IMF2-IMF5. Hasil penjumlahan IMF yang terpilih, didapatkan hasil berupa sinyal baru yang telah terpisah dari noise-noise yang tidak diharapkan. Hasil filter NA-MEMD tersebut dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 4.3:

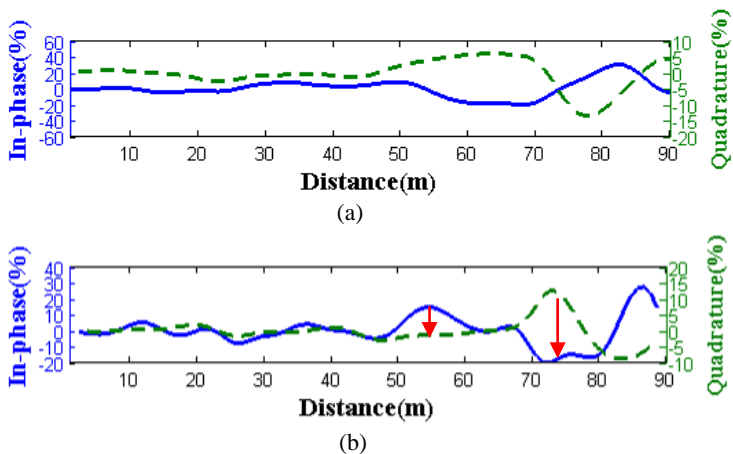


Gambar 4.3 Data Inphase dan Quadrature setelah *filtering* menggunakan NA-MEMD pada lintasan 1. Titik merah merupakan posisi *zero-crossing* antara Inphase dan Quadrature

Hasil *filtering* menghasilkan grafik korelasi yang lebih *smooth* daripada sebelum *filtering* sebagaimana terlihat pada Gambar 4.3. Posisi anomali atau yang ditunjukkan oleh posisi *zero-crossing* menjadi lebih terlihat jelas dikarenakan adanya proses reduksi bilangan gelombang tinggi dan nilai residu.

#### 4.1.2 Filter Fraser dan Karous-Hjelt

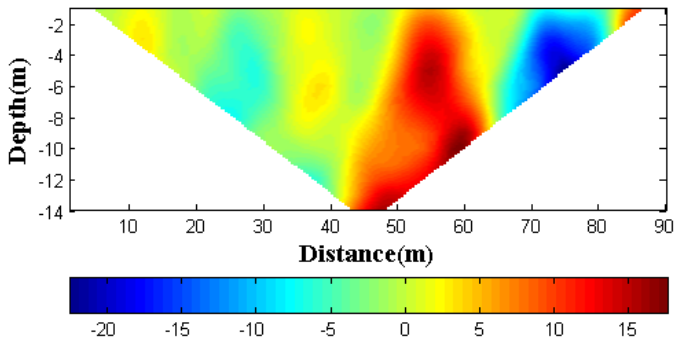
Filter Fraser dan Karous-Hjelt digunakan untuk menentukan letak anomali secara kualitatif. Anomali data VLF-EM dapat diidentifikasi dari persilangan antara kurva *inphase* dan *quadrature*. Anomali konduktif ditandai dengan kurva *inphase* yang bernilai positif dan kurva *quadrature* bernilai negatif. Sedangkan untuk anomali resistif berlaku sebaliknya (Sungkono et. al., 2008). Sebagai contoh, Gambar 4.4 merupakan korelasi antara data VLF-EM dan hasil filter Fraser. Gambar ini menunjukkan bahwa anomali data VLF-EM terletak pada jarak 50-60 meter yang ditunjukkan oleh adanya zero-crossing pada data Inphase dan Quadrature, serta nilai optimum pada hasil filter Fraser. Sedangkan anomali resistif ditunjukkan pada posisi 70-80 meter dari titik awal pengukuran.



Gambar 4.4 Nilai inphase dan quadrature (a) sebelum dilakukan filter Fraser dan (b) setelah dilakukan filter Fraser pada Lintasan 1. Garis berwarna merah menunjukkan adanya anomali.

Berbeda dengan Filter Fraser, hasil dari Filter Karous-Hjelt berupa peta kontur 2D dengan parameter rapat arus sebagai fungsi kedalaman semu sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4.5. Pada filter ini diasumsikan bahwa medan magnet yang terukur disebabkan oleh nilai rapat arus di bawah permukaan tanah. Nilai

kedalaman semu ditentukan oleh spasi pengukuran (Jeng et. al., 2012).



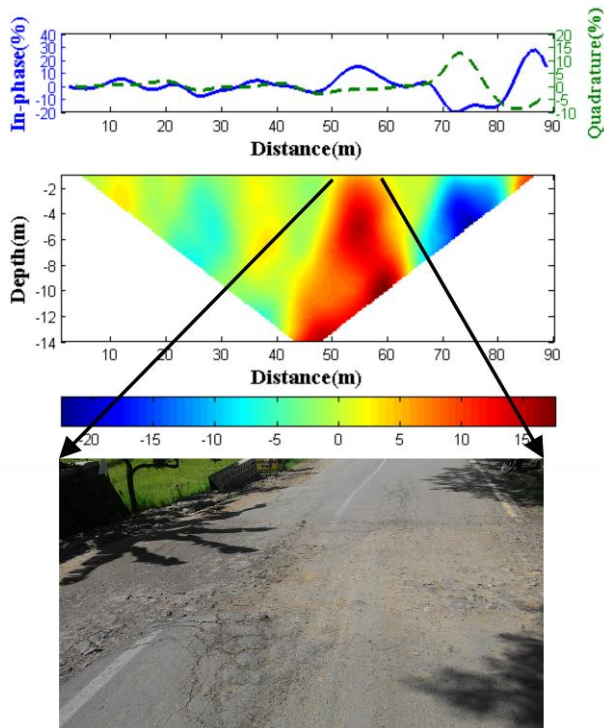
Gambar 4.5 Peta kontur 2D dengan parameter rapat arus pada lintasan 1

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa warna merah mengindikasikan anomali konduktif, sebaliknya, warna biru menunjukkan anomali yang bersifat resistif. Anomali konduktif biasanya mengindikasikan posisi retakan, hal ini dikarenakan pada bidang retakan dapat berisikan fluida (air) atau lempung (Vargemezis, 2007).

Hasil filter Fraser dan Karous-Hjelt ini berkorelasi dengan kondisi lapangan yang mana pada jarak 50-60 meter dari awal pengukuran terdapat retakan akibat pergerakan tanah sebagaimana terlihat pada Gambar 4.6

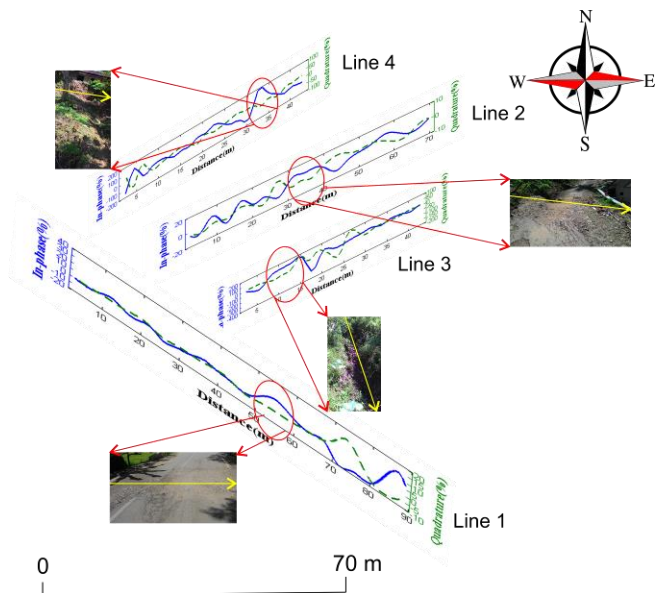
Meskipun pada filter ini sudah didapatkan faktor kedalaman, namun kedalaman tersebut bersifat semu (bukan kedalaman yang sebenarnya). Sehingga diperlukan metode inversi untuk mendapatkan nilai kedalaman yang sesungguhnya dari bidang anomali tersebut.



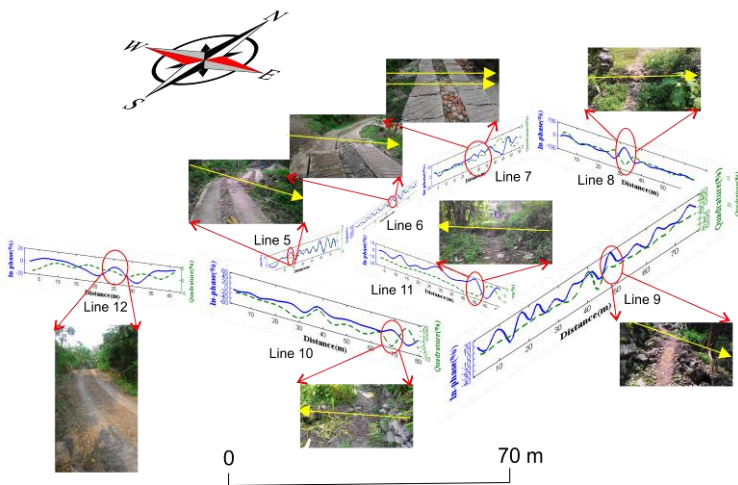


Gambar 4.6 Korelasi hasil filter Fraser, Karous-Hjelt, dan kondisi lapangan penelitian

Lokasi penelitian ini dibagi menjadi dua titik, yakni bagian bawah dan atas. Pada bagian bawah dilalui oleh lintasan 1 hingga 4. Sedangkan bagian atas terdiri dari lintasan 5 hingga 12. Penggabungan hasil filter Fraser dan Karous-Hjelt pada bagian bawah dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 4.7. Anomali ditandai dengan lingkaran berwarna merah yang berkorelasi dengan kondisi lapangan penelitian. Panah berwarna kuning menunjukkan arah retakan yang terjadi pada lintasan tersebut.



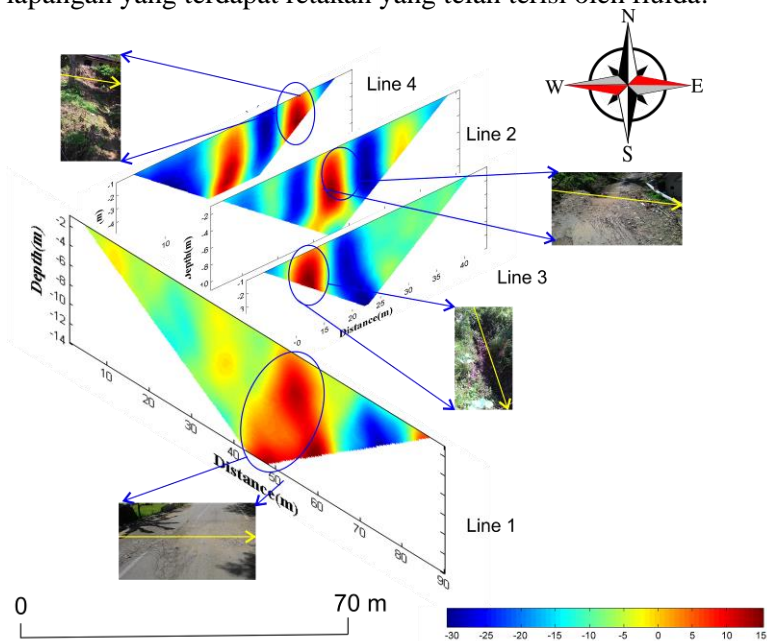
Gambar 4.7 Hasil filter Fraser pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan.



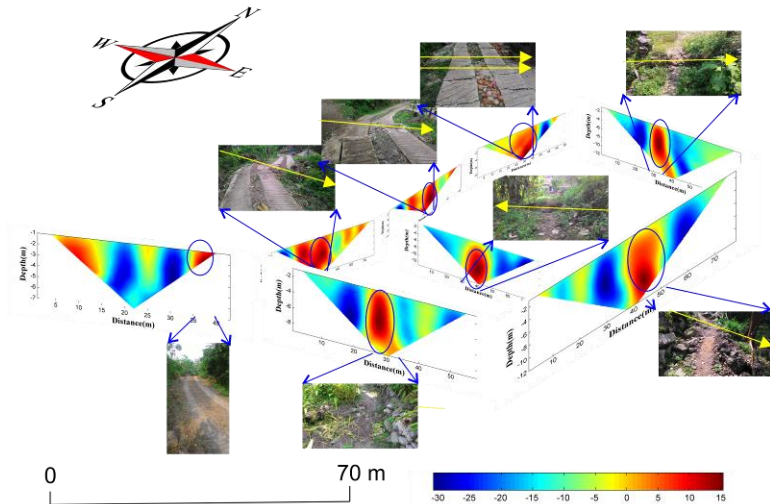
Gambar 4.8 Hasil filter Fraser pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan.

Gambar 4.7 menunjukkan adanya kemenerusan anomali dari lintasan 4 hingga 1 yang ditunjukkan dengan lingkaran berwarna merah. Kemenerusan anomali tersebut mengarah dari utara menuju ke selatan. Anomali tersebut berkorelasi dengan kondisi geologi lokasi penelitian yang mengalami keretakan yang mengarah dari utara menuju selatan. Anak panah berwarna kuning menunjukkan arah retakan pada lintasan tersebut.

Sedangkan pada Gambar 4.8 merupakan hasil filter Fraser pada lintasan 5 hingga 12. Anomali setiap lintasan tersebut menunjukkan adanya keterkaitan yang mengarah dari utara menuju selatan. Arah anomali ini berkorelasi dengan kondisi lapangan yang terdapat retakan yang telah terisi oleh fluida.



Gambar 4.9 Hasil filter Karous-Hjelt pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan



Gambar 4.10 Hasil filter Karous-Hjelt pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan

Gambar 4.9 dan 4.10 merupakan hasil filter Karous-Hjelt pada lintasan 1-4 dan 5-12. Kedua gambar tersebut memiliki posisi anomali yang hampir sama dengan gambar hasil filter Fraser. Dikarenakan filter ini merupakan pengembangan dari filter Fraser yang dapat memberikan gambaran kontur 2D dari nilai rapat arus sebagai fungsi kedalaman semu. Berdasarkan pada Gambar 4.9 dan 4.10 diketahui bahwa arah anomali berasal dari utara menuju ke selatan lokasi penelitian. Hampir sama dengan posisi anomali yang terdapat pada filter Fraser.

#### 4.2 Analisa Kuantitatif (Inv2DLF)

Untuk menganalisa data VLF-EM secara kuantitatif, dilakukan proses inversi menggunakan software Inv2DVLF. Software ini menggunakan pemodelan kedepan (*forward modelling*) yang berbasis *finite element* atau *finite difference*. Software Inv2DVLF berfungsi sebagai proses inversi data VLF-EM. Software ini menggunakan solusi dari metode *finite element* (FEM) untuk mendapatkan model resistivitas 2D.

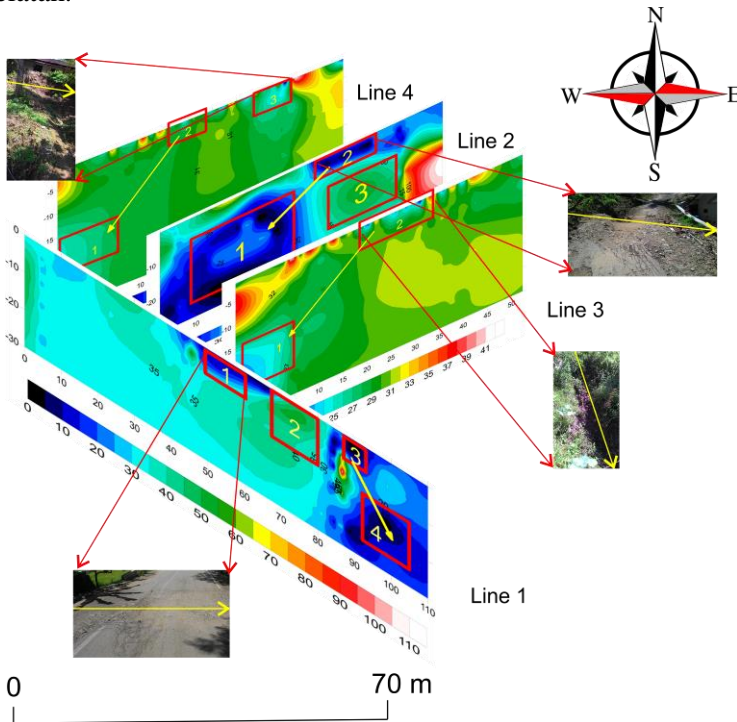
Terdapat beberapa data yang dibutuhkan dalam proses inversi, diantaranya adalah nilai resistivitas model awal, jumlah iterasi, dan parameter lagrange. Nilai resistivitas model awal harus mempertimbangkan nilai resistivitas penyusun formasi setempat. Penelitian ini dilakukan di daerah dengan Formasi Watupatok yang tersusun dari lava, sisipan batupasir, batu lempung, dan rijang. Nilai resistivitas pada batuan penyusun Formasi Watupatok berkisar antara 1-100  $\Omega$ .m. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan nilai resistivitas awal sebesar 50  $\Omega$ .m. Selanjutnya, untuk mendapatkan hasil dengan nilai error kecil, digunakan iterasi sebanyak 100 kali dengan nilai parameter *Lagrange* sebesar 0,03. Inversi ini menghasilkan parameter jarak (m), kedalaman (m), dan nilai resistivitas ( $\Omega$ m). Setelah proses inversi, kedalaman yang didapatkan pada lintasan 1 menjangkau hingga 70 meter dibawah permukaan tanah. Namun kedalaman yang digunakan harus disesuaikan dengan nilai *skin depth*. Hal ini berdasarkan pada nilai *skin depth* yang menyatakan bahwa kedalaman maksimum yang mampu dijangkau oleh medan VLF-EM mencapai 30 meter sebagaimana pada Persamaan (2.15).

Data hasil inversi dapat dimodelkan 2 dimensi dengan menggunakan software Surfer 11. Berbeda dengan hasil dari filter Karous-Hjelt yang berupa kedalaman semu, inversi mampu menghasilkan nilai kedalaman yang sebenarnya. Pemodelan 2-D dari hasil inversi lintasan 1-4 dapat dilihat sebagaimana pada Gambar 4.11.

Gambar 4.11 merupakan gabungan dari hasil inversi lintasan 1-4 yang saling berkorelasi. Kotak berwarna merah merupakan letak dari anomali yang terdapat di lintasan tersebut. Anomali konduktif diidentifikasi sebagai warna biru, sedangkan anomali resistif berwarna merah. Pada gambar tersebut juga ditampilkan kondisi lapangan pada posisi anomali konduktif berupa retakan yang diduga telah terisi fluida. Anak panah berwarna kuning menunjukkan arah retakan yang terjadi pada lintasan tersebut.

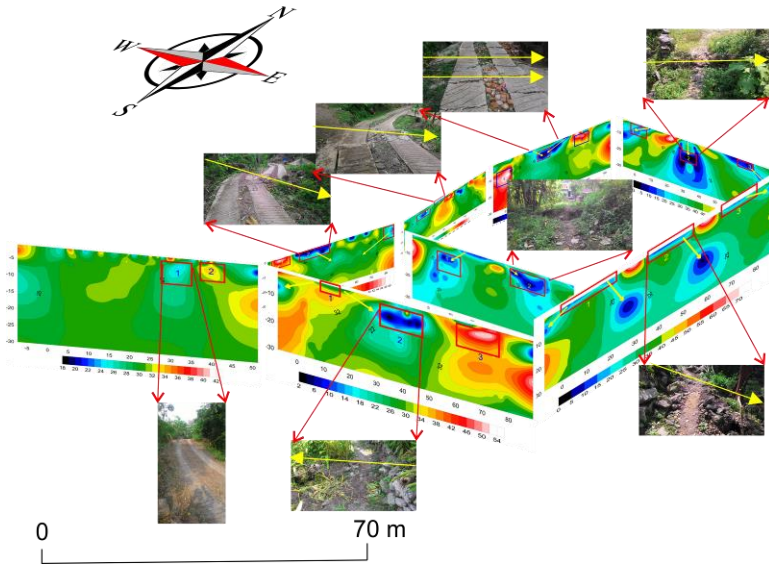
Berdasarkan pada Gambar 4.11, terdapat kemenerusan lapisan bawah permukaan yang memiliki anomali konduktif. Lapisan yang konduktif diwakili oleh kontur yang berwarna biru

yang berarti memiliki nilai resistivitas rendah, lapisan ini berasal dari lintasan 4 hingga lintasan 1 yang mengarah dari utara menuju selatan.



Gambar 4.11 Hasil Inversi pada Lintasan 1-4 beserta kondisi lapangan.

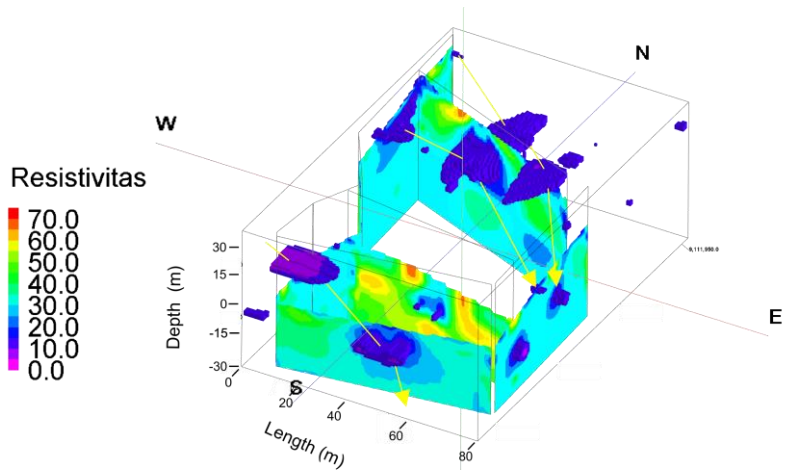
Seperti halnya dengan Gambar 4.11, Gambar 4.12 juga merupakan gabungan dari hasil inversi pada lintasan 5-12. Hasil dari penggabungan ini dapat dilihat bahwa lapisan yang konduktif memiliki keterkaitan dari lintasan 5-12. Anomali yang berwarna biru menunjukkan adanya lapisan yang memiliki resistifitas yang rendah. Anomali tersebut berkorelasi dengan kondisi lapangan yang terdapat retakan yang diduga telah tersaturasi fluida berupa air.



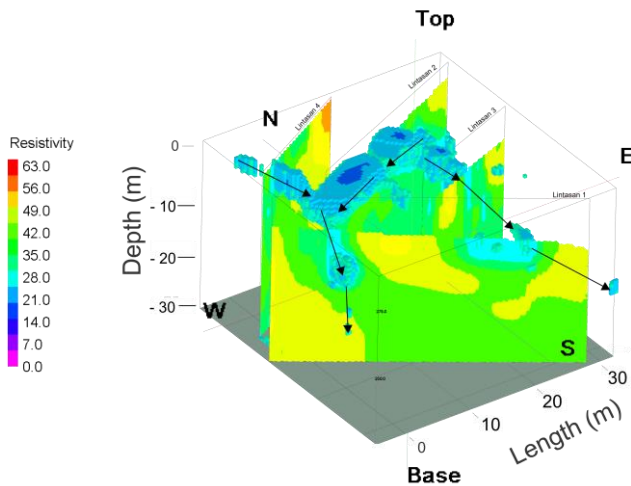
Gambar 4.12 Hasil Inversi pada Lintasan 5-12 beserta kondisi lapangan.

### 4.3 Model 3 Dimensi

Resistivitas 2D hasil inversi tersebut, selanjutnya digunakan untuk membuat model 3D dengan menggunakan software Rockwork16. Data input yang dibutuhkan pada proses ini diantaranya adalah nilai latitude, longitude, elevasi, dan nilai resistivitas tiap kedalaman. Hasil permodelan 3D sebagaimana terlihat pada Gambar 4.13 dan 4.14.

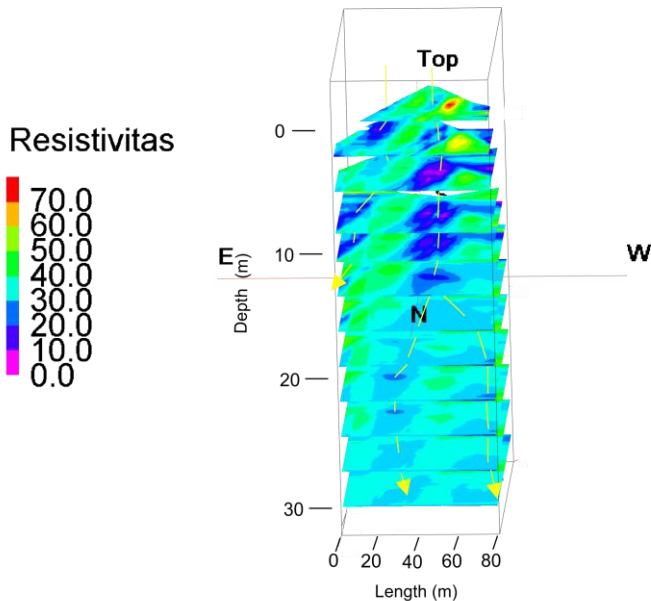


Gambar 4.13 Hasil plot 3D persebaran fluida lokasi penelitian bagian atas



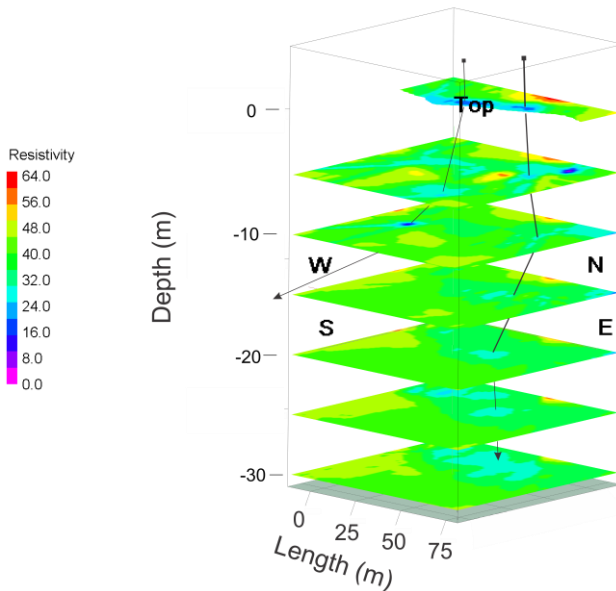
Gambar 4.14 Hasil plot 3D persebaran fluida lokasi penelitian bagian bawah





Gambar 4.15 Hasil model 3D dengan sayatan horisontal tiap kedalaman pada bagian atas

Gambar 4.13 merupakan penampang 3D persebaran fluida pada bagian atas lokasi penelitian, sedangkan Gambar 4.14 merupakan penampang 3D persebaran fluida pada bagian bawah lokasi penelitian. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada daerah penelitian terdapat beberapa anomali resistivitas rendah yang ditunjukkan oleh warna biru dan anomali resistivitas tinggi dengan warna merah. Nilai resistivitas rendah diduga merupakan retakan atau tanah yang terisi fluida dan atau lempung. Fluida tersebut diduga berasal dari aliran air yang berada di bagian atas lokasi penelitian atau bisa juga berasal dari air hujan. Panah pada Gambar 4.13 merupakan dugaan arah persebaran saturasi fluida terhadap tanah yang mengarah dari barat menuju ke timur. Sedangkan pada Gambar 4.14 mengarah dari utara ke selatan.



Gambar 4.16 Hasil model 3D dengan sayatan horisontal tiap kedalaman pada bagian bawah

Selain itu, untuk mengetahui arah persebaran saturasi fluida secara vertikal, dilakukan pemodelan 3D dengan sayatan horisontal tiap kedalaman 8 m dari permukaan tanah. Dugaan arah aliran fluida (air) yang masuk ke dalam tanah ditunjukkan oleh panah warna hitam sebagaimana terlihat pada Gambar 4.15. Fluida yang masuk ke dalam tanah mengakibatkan lapisan tanah menjadi jenuh. Hal tersebut didukung oleh adanya anomali konduktif pada bagian atas penelitian dengan kedalaman  $\pm 5\text{m}$  dari permukaan dan nilai resistifitas  $\pm 6 \Omega\text{m}$  sebagaimana pada Gambar 4.15. Sedangkan pada Gambar 4.16 menunjukkan bahwa pada kedalaman  $\pm 10\text{m}$  memiliki nilai resistifitas  $\pm 10 \Omega\text{m}$ . Dengan adanya fakta tersebut, menunjukkan bahwa daerah penelitian tersebut termasuk daerah rawan longsor.

***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan uraian hasil analisa data, pembahasan dan kajian literatur, dalam penelitian ini memiliki beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Anomali konduktif berkorelasi dengan posisi retakan yang tersaturasi fluida.
2. Hasil permodelan 3D menunjukkan adanya bidang longsor yang berpotensi tanah longsor.
3. Lokasi yang berpotensi terjadi tanah longsor di Desa Tugurejo, Kecamatan Slahung, Kabupaten Ponorogo berada pada kedalaman 5-12 m yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas yang rendah.

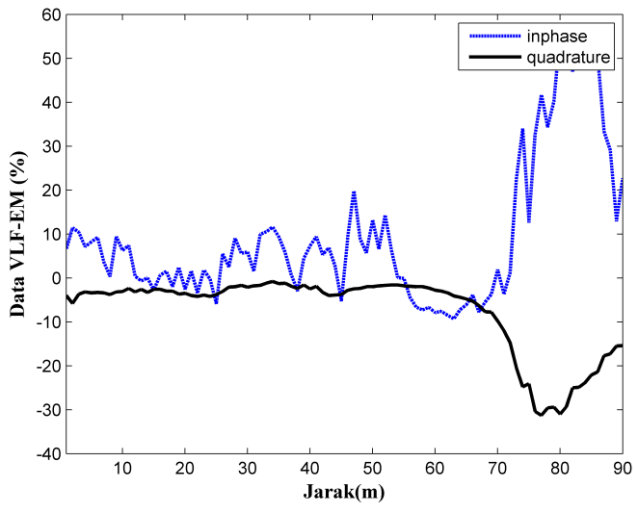
***“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”***

## DAFTAR PUSTAKA

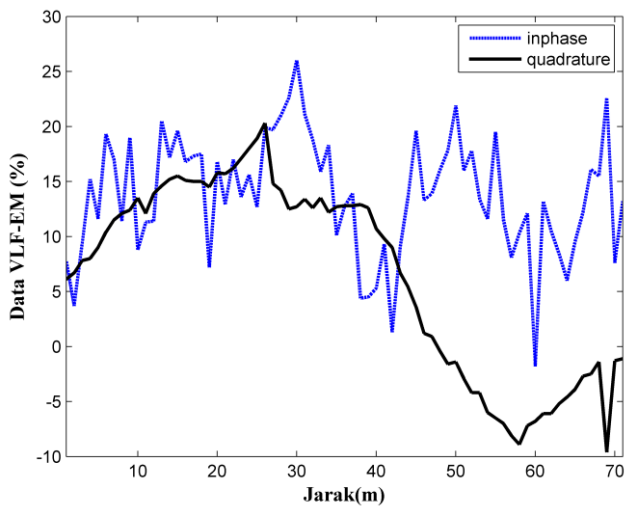
- Bemmelen, R.W.V., 1949. The Geology of Indonesia Vol. 1A.
- Djuri, M., Samodra, H., Amin, T.C., dan Gafoer, S., 1992. *Peta Geologi Lembar Trenggalek, skala 1:100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Ghufron, 2010. Estimasi Penyebaran Deposit Fosfat di Wilayah Perum Perhutani KPH Pati BKPH Sukolilo Pati dengan Metode Very Low Frequency Elektromagnetik Vertikal Gradient (VLF-EM-VGRAD). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Fisika FMIPA.
- Grandis, H., 2009. Pengantar pemodelan inversi geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Hunsucker, R.D., 2009. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation.
- Indriyani, D.D., 2014. Pemetaan Distribusi Aliran Sungai Bawah Tanah. Universitas Negeri Semarang, Jurusan Fisika FMIPA.
- Jeng, Y., Lin, M.-J., Chen, C.-S., Wang, Y.-H., 2007. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method.
- Kaikkonen, P., 1979. Numerical VLF Modelling, Geophysical Prospecting.
- Rehman, N.U., Park, C., Huang, N. E. and Mandic, D. P. 2013. EMD Via MEMD: Multivariate Noise-Aided computation of standart EMD.
- Sasaki, Y., 2001. Full 3-D inversion of electromagnetic data on PC. J. Appl. Geophys 46, 45–54.
- Sassa, K., Tsuchiya, S., Fukuoka, H., Mikos, M., Doan, L., 2015. Landslides: review of achievements in the second 5-year period (2009–2013). Landslides 12, 213–223. doi:10.1007/s10346-015-0567-4
- Sharma, S.P., Biswas, A., Baranwal, V.C., 2014. Very Low-Frequency Electromagnetic Method: A Shallow Subsurface Invertigation Technique for Geophysical Applications.

- Shi, J.S., Wu, L.Z., Wu, S.R., Li, B., Wang, T., Xin, P., 2016. Analysis of the causes of large-scale loess landslides in Baoji, China. *Geomorphology* 264, 109–117. doi:10.1016/j.geomorph.2016.04.013
- Sungkono, Bahri Ayi, Warnana Dwa, Monteiro, S., Santosa, B.J., 2014. Fast, simultaneous and robust VLF-EM data denoising and reconstruction via multivariate empirical mode decomposition, *Computers & Geoscience* 67, 125–138.
- Supriyanto, 2007. Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi.
- Watts, R.D., 1978. Electromagnetic Scattering from Buried Wires 43, 767–781.
- Wijaya, O., 2014. Identifikasi Patahan Bawah Permukaan untuk Evaluasi Mud Vulcano di Gunung Anyar Tengah – Surabaya dengan Metode Very Low Frequency – Electromagnetic (VLF-EM). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- Wijayanti, N., 2017. Pemetaan Aliran Sungai Bawah Tanah di Daerah Rengel-Tuban dengan Menggunakan Metode Very Low Frequency- Electromagnetic (VLF-EM). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Fisika FMIPA ITS.

## Lampiran 1

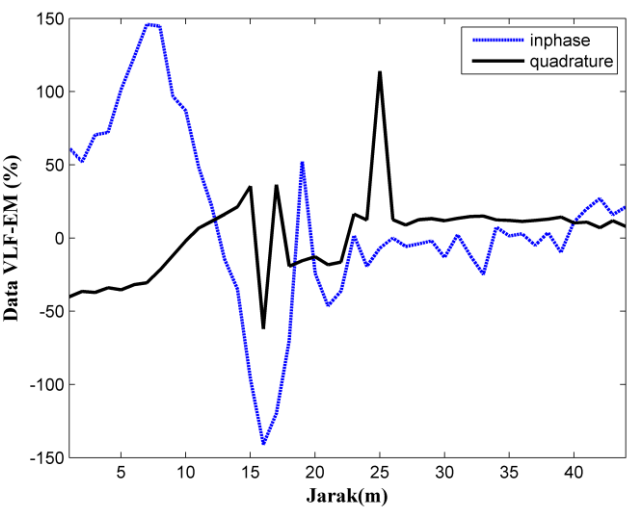


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 1

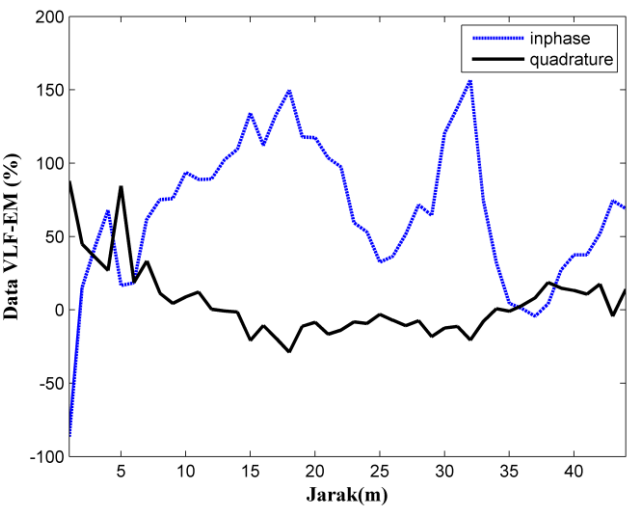


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 2

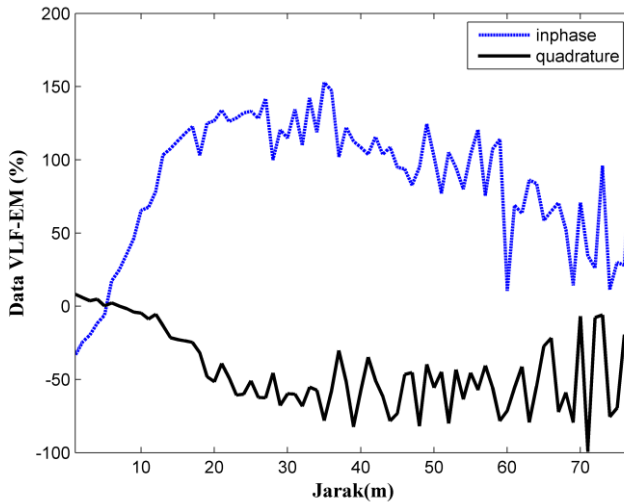




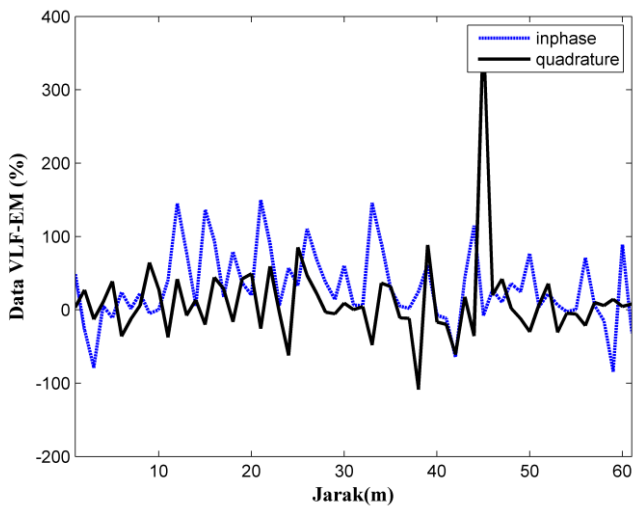
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 3



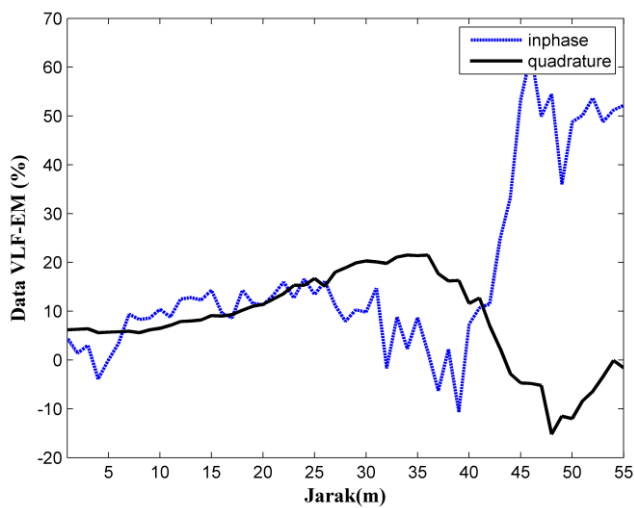
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 4



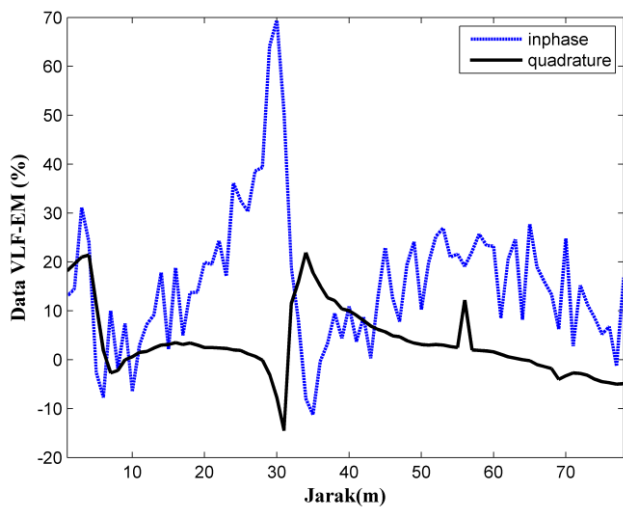
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 5



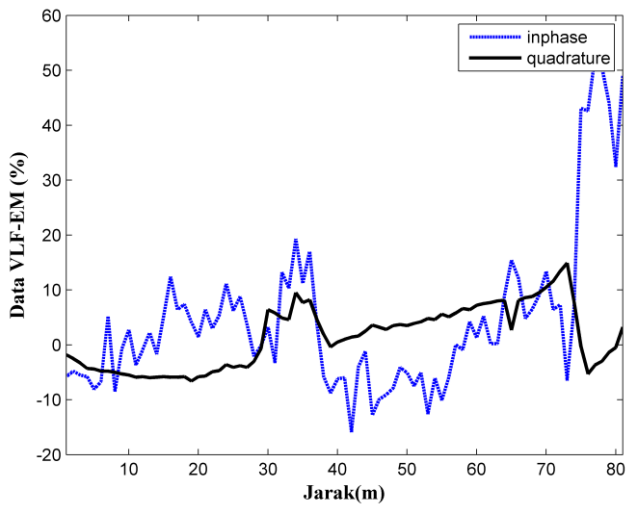
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 6



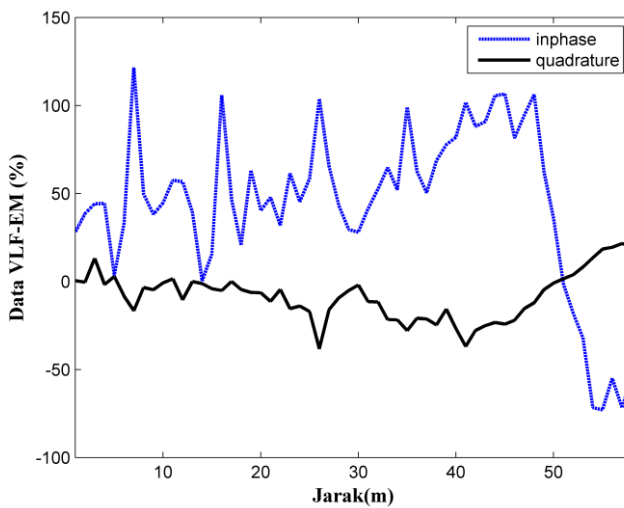
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 7



Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 8

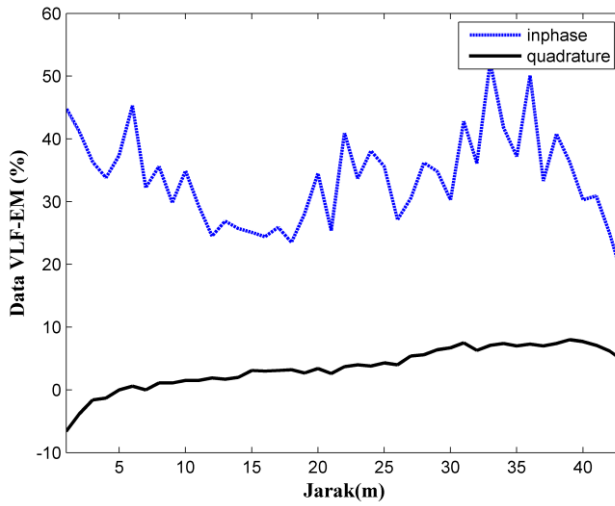


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 10



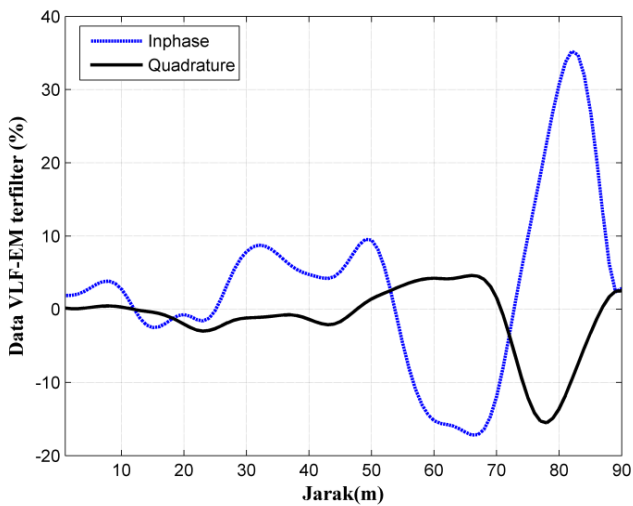
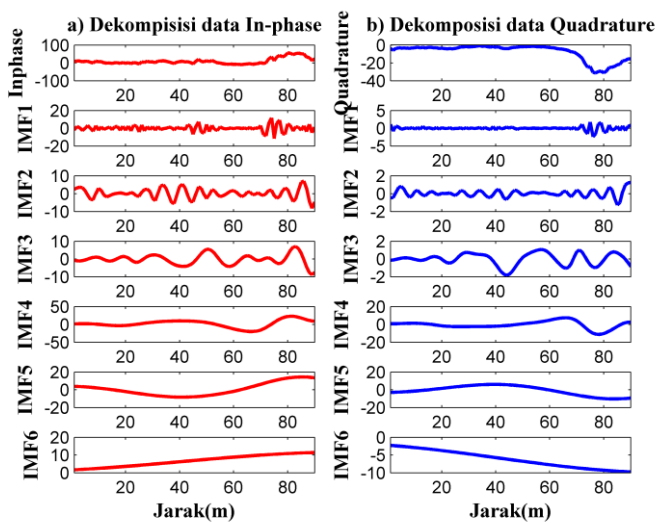
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 11

Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 11

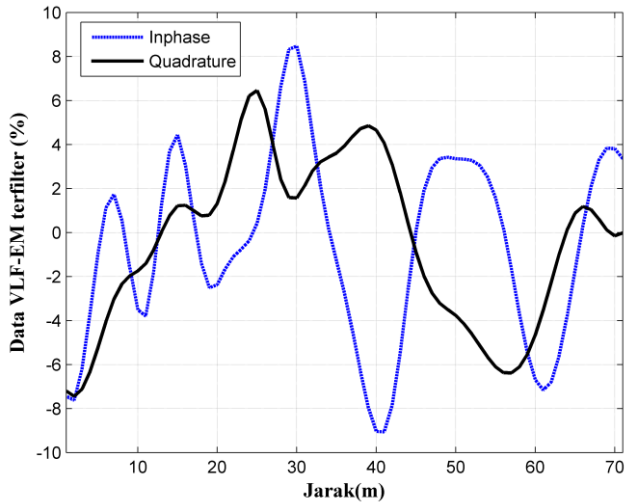
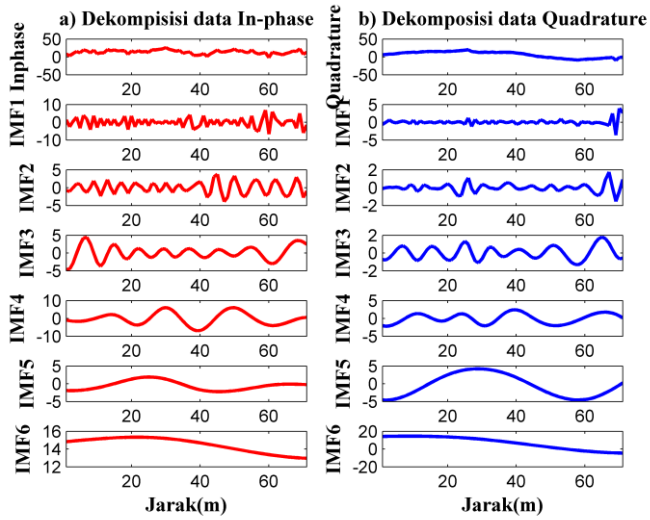


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* pada lintasan 12

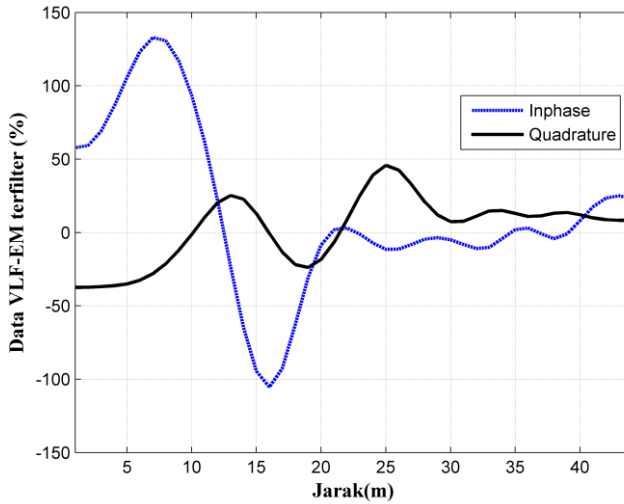
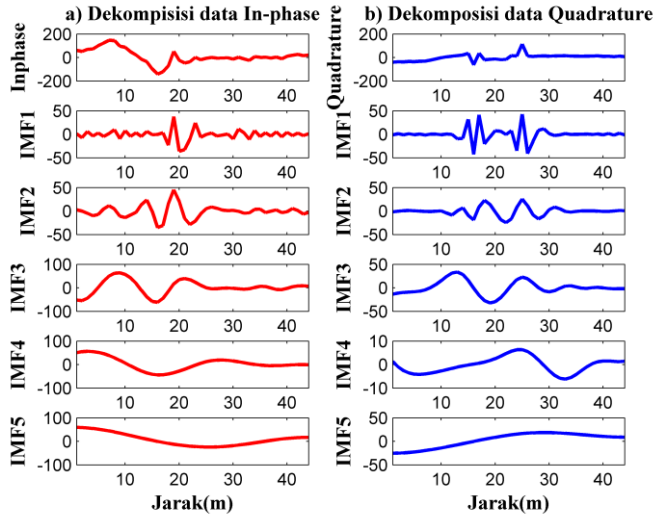
## Lampiran 2



Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 1

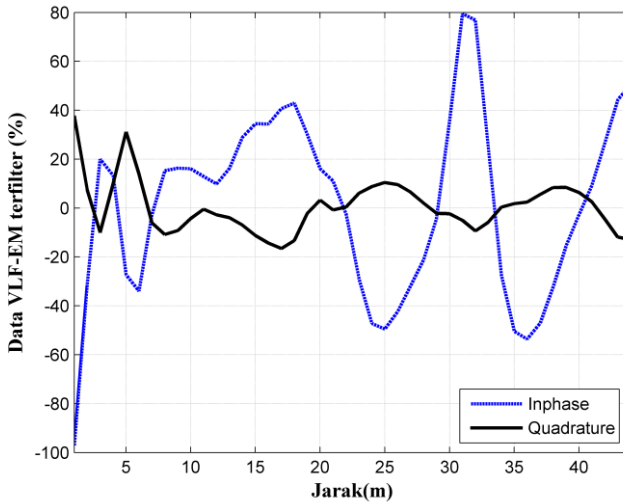
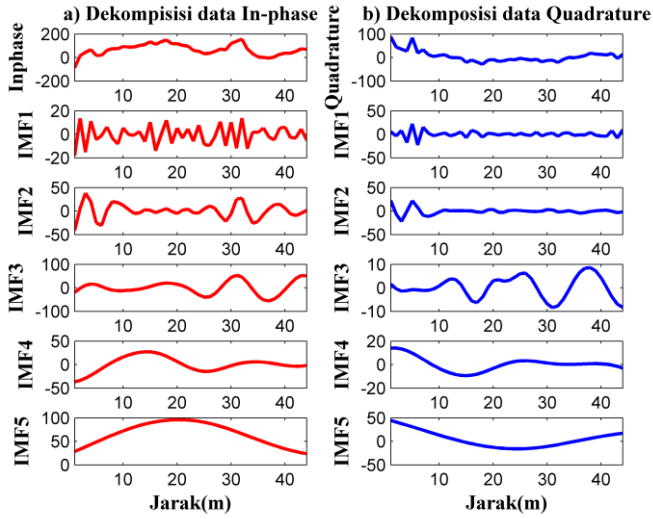


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 2

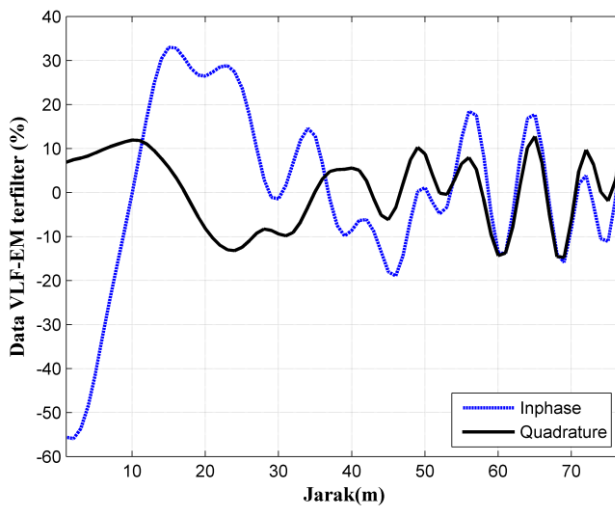
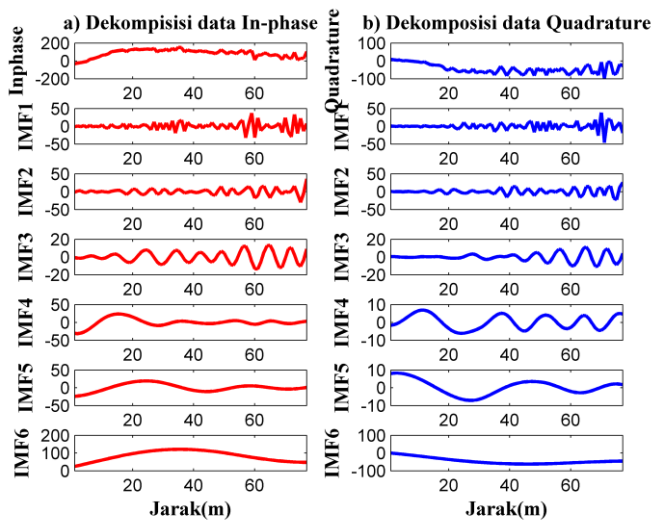


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 3

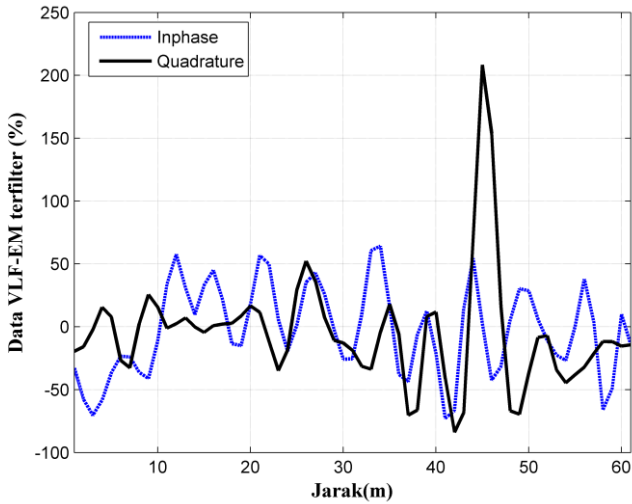
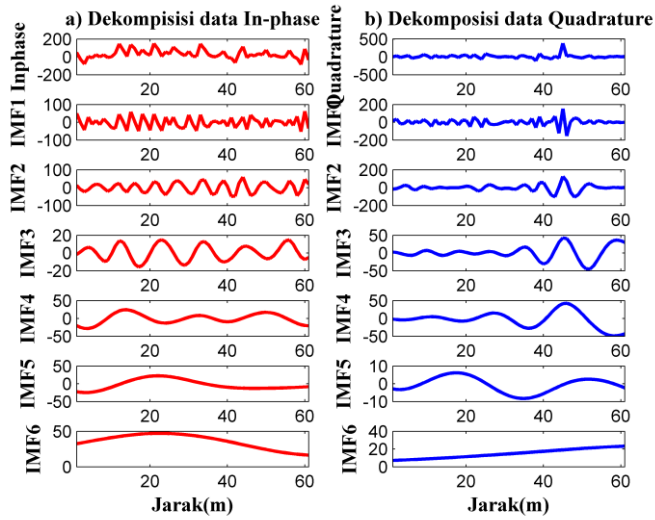




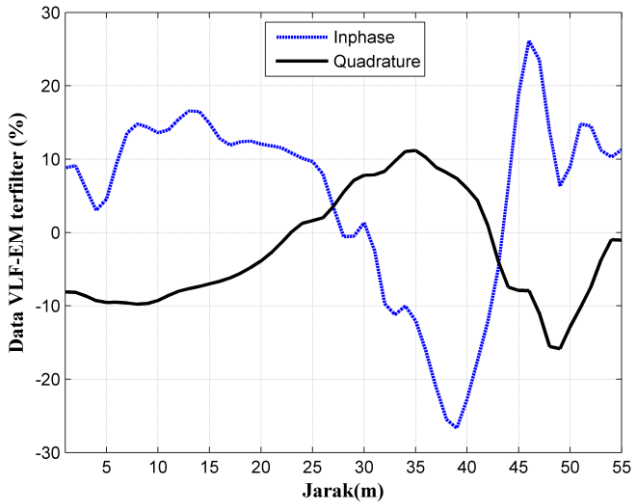
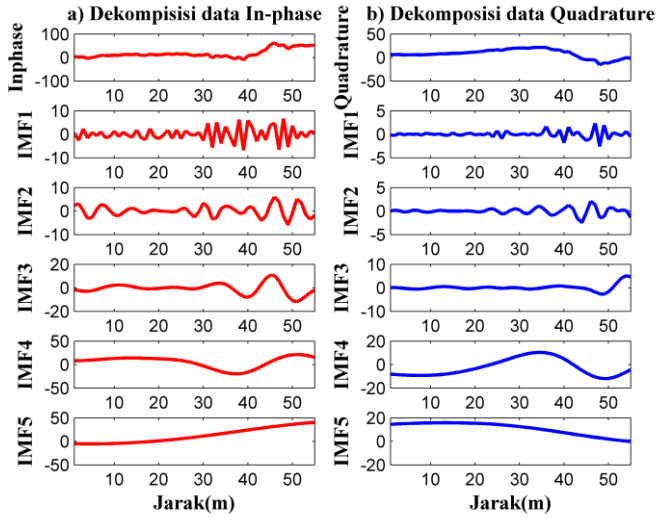
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 4



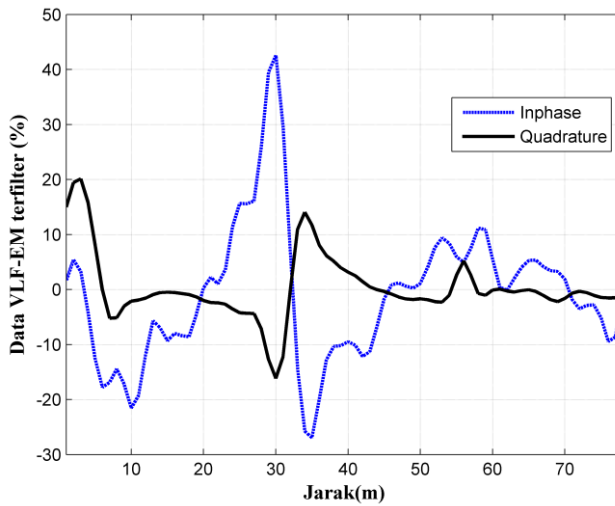
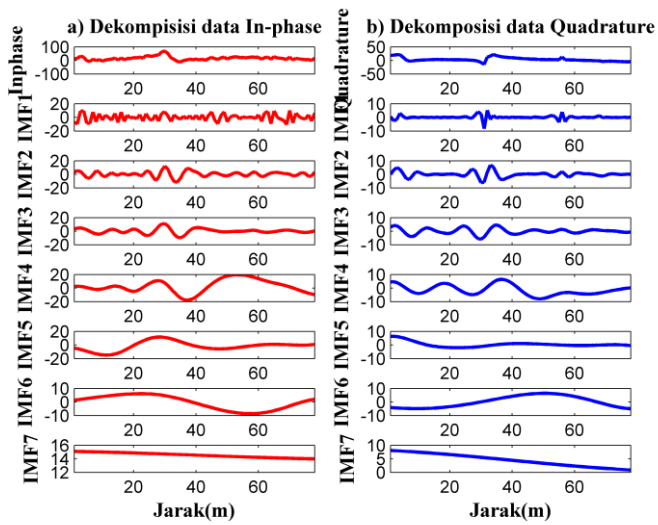
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 5



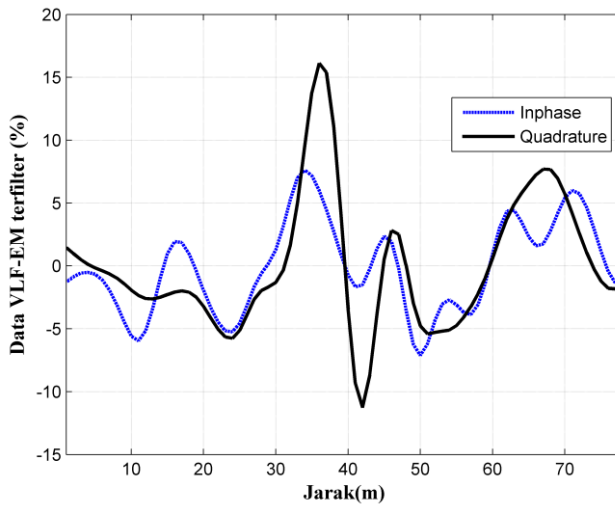
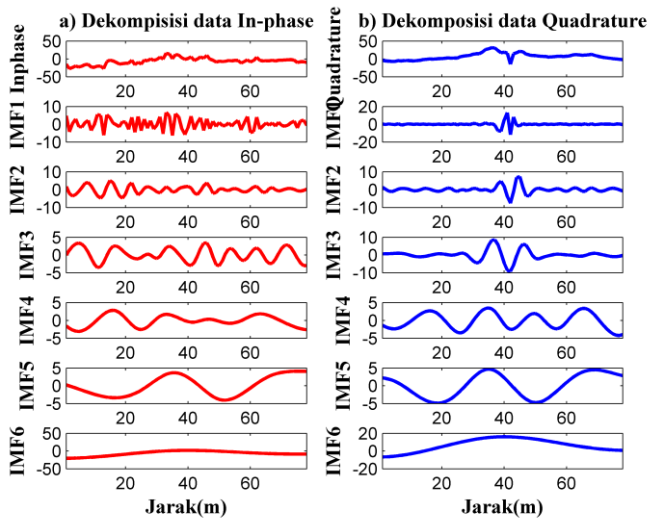
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 6



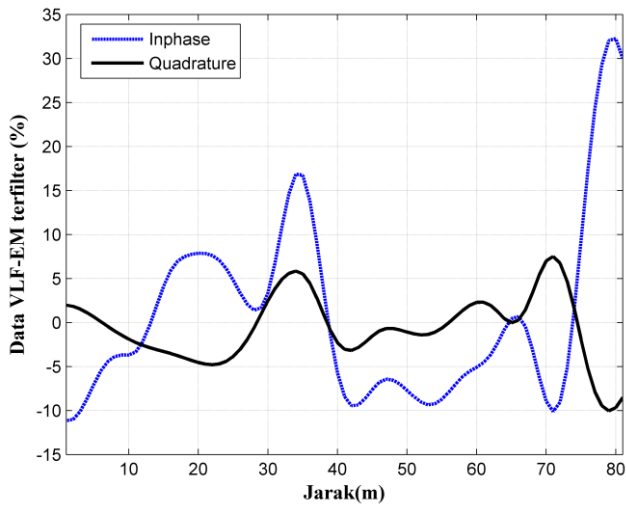
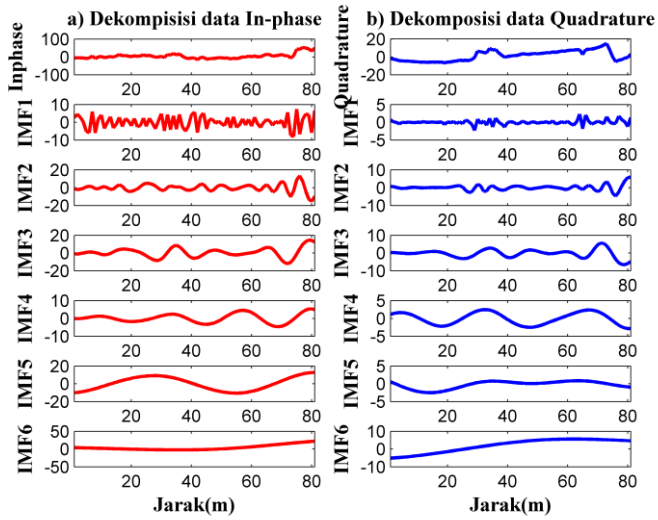
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 7



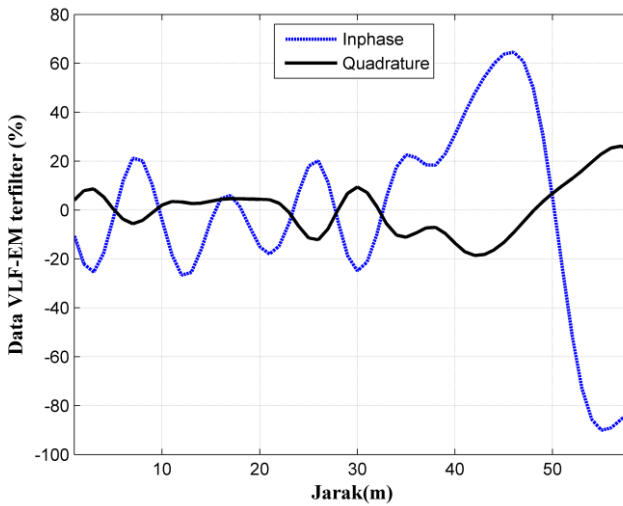
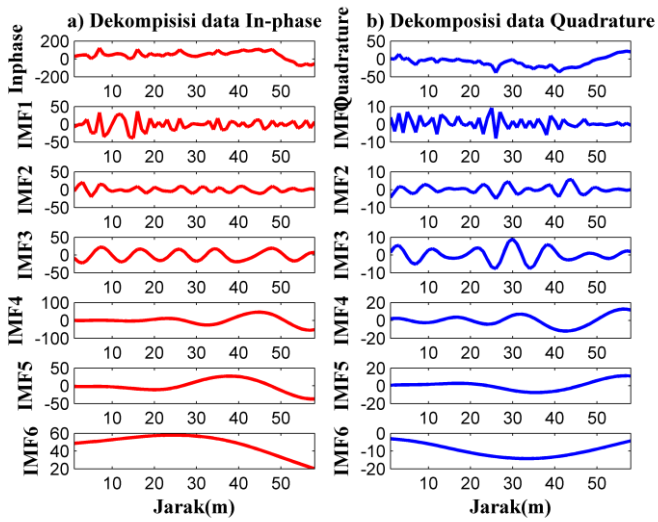
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 8



Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 9

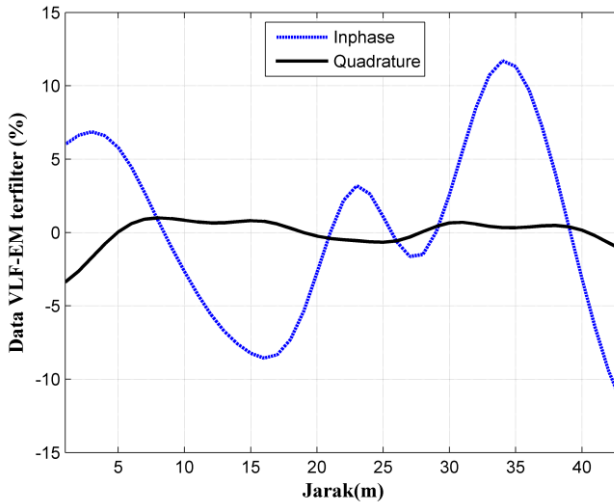
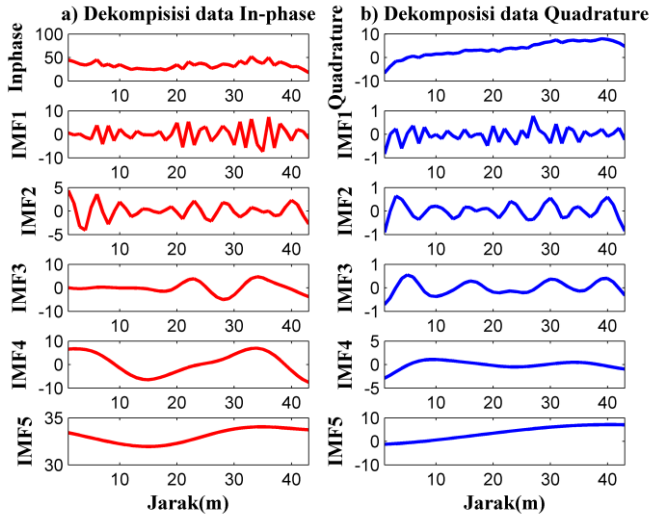


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 10



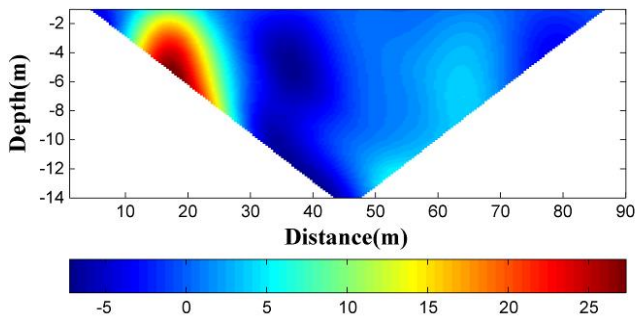
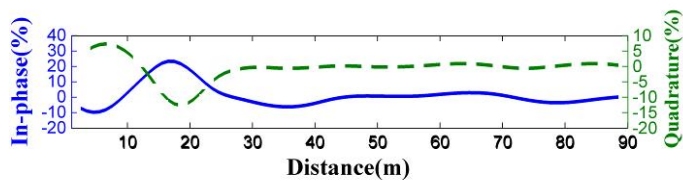
Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 11



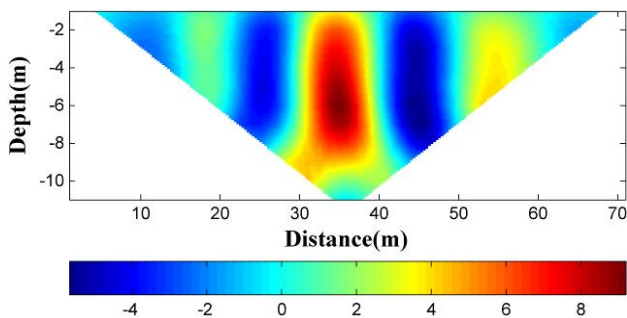
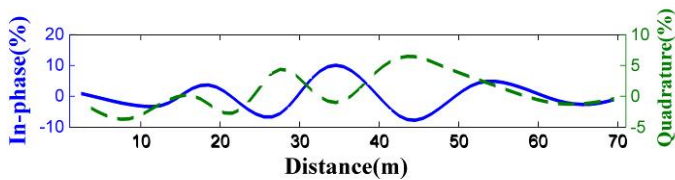


Korelasi antara data *inphase* dan *quadrature* setelah dilakukan filter NA-MEMD pada lintasan 12

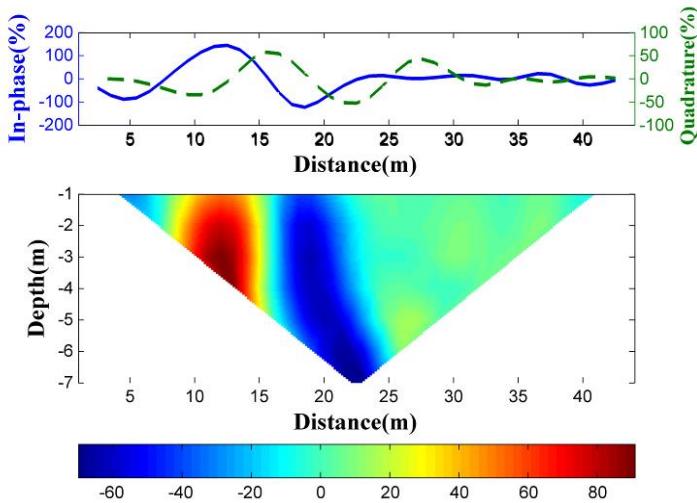
### Lampiran 3



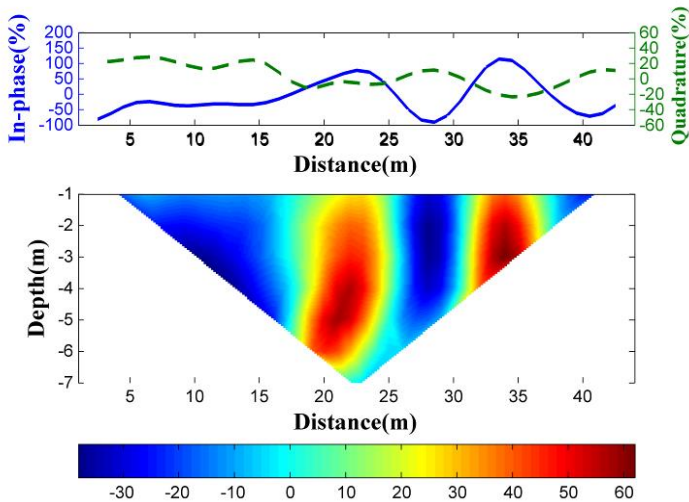
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 1



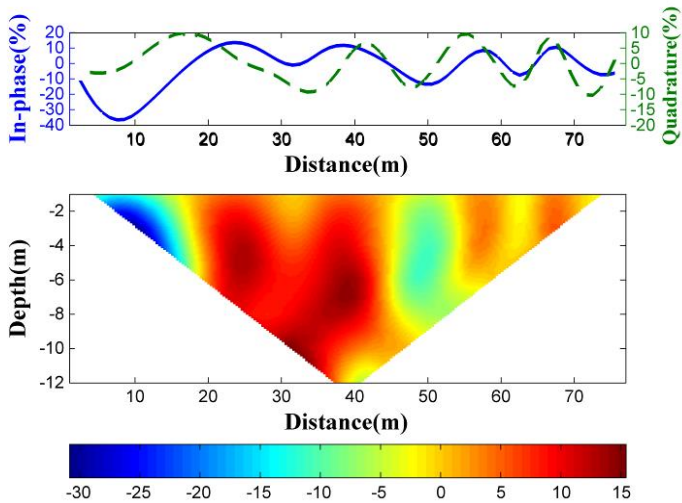
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 2



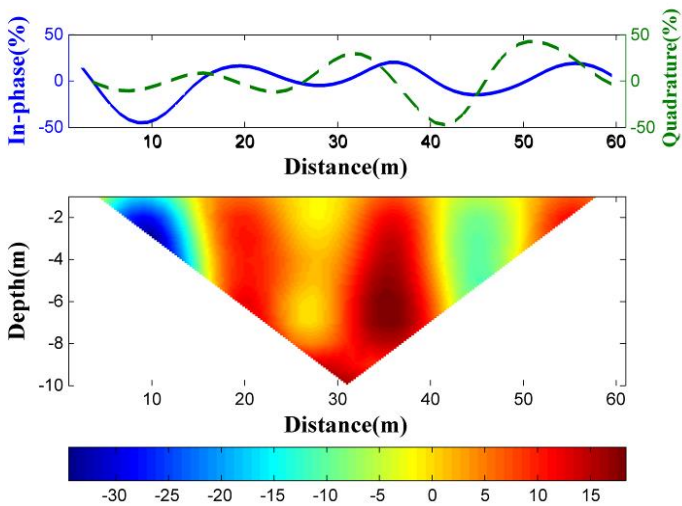
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 3



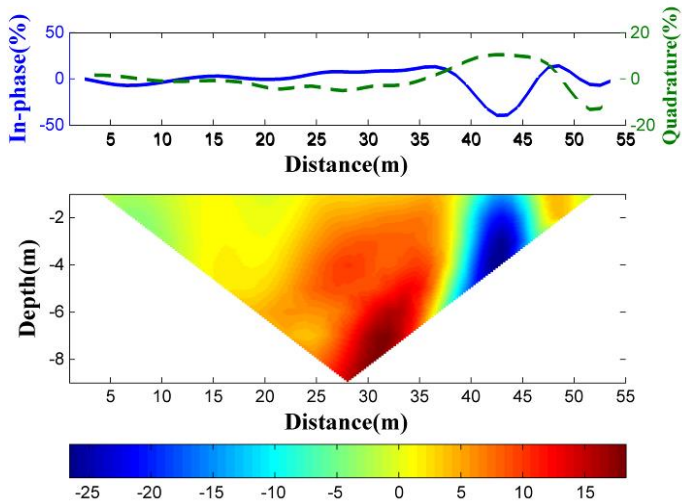
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 4



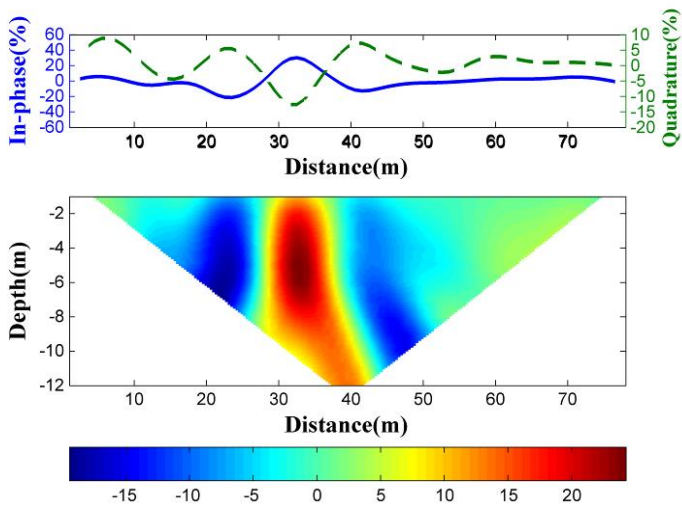
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 5



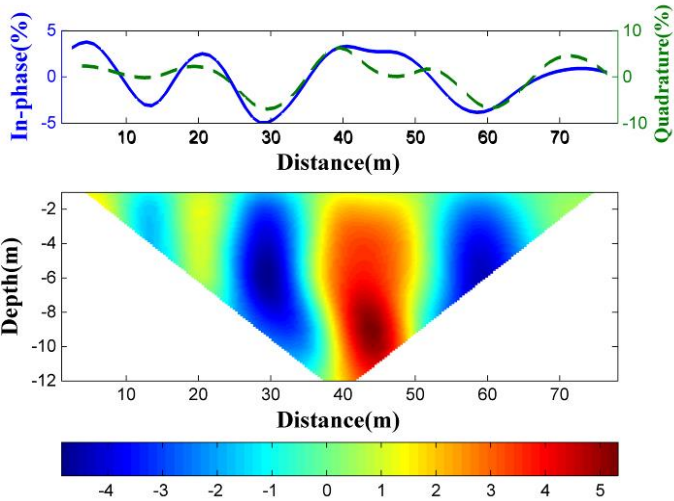
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 6



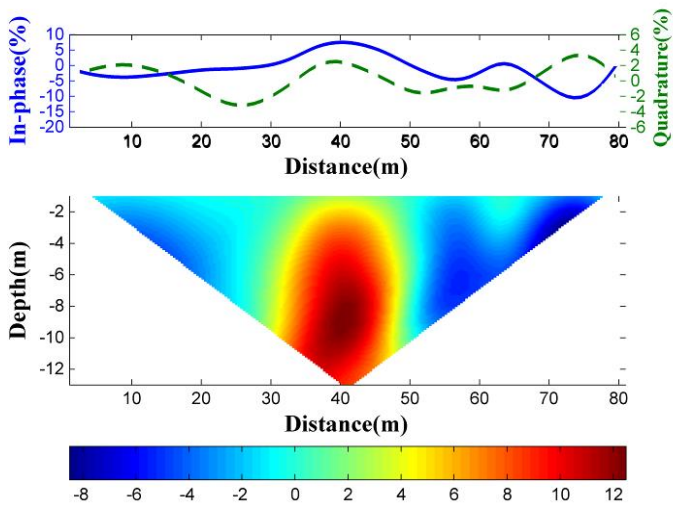
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 7



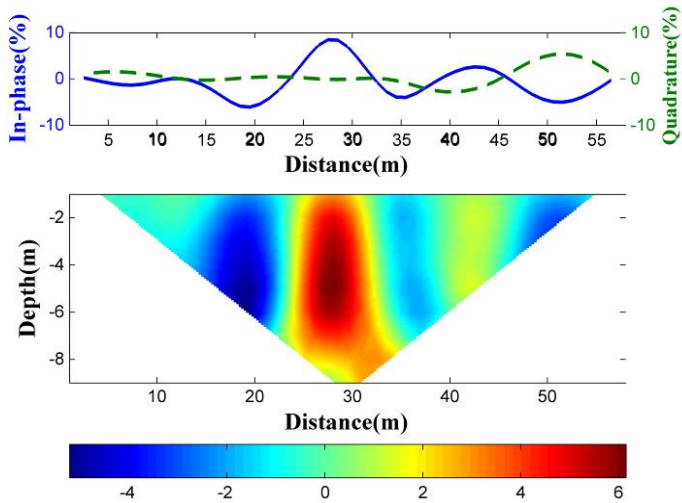
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 8



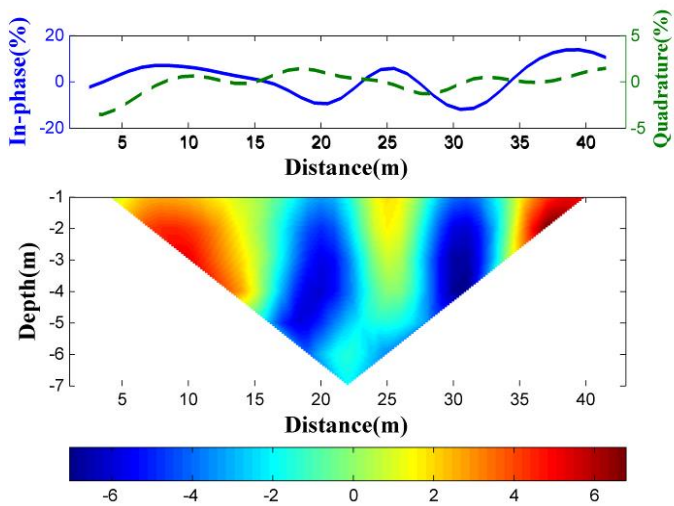
Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 9



Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 10



Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 11



Hasil dari Filter Fraser dan Karous-Hjelt pada lintasan 12



## Lampiran 4



Proses akusisi data



Survey Awal



Salah satu kerusakan akibat pergerakan tanah



Salah satu kerusakan akibat dari pergerakan tanah



## BIODATA PENULIS



Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara yang dilahirkan di Tulungagung pada 27 Juli 1995 dari pasangan Salman Hudiyono dan Nikmatus Sholikah. Semasa kecil penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 1 Majan II, SMPN 1 Tulungagung dan SMA Lukman Al-Hakim Surabaya. Pada pertengahan tahun 2013 penulis diterima di Departemen Fisika FMIPA ITS melalui jalur SBMPTN dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 1113100069.

Selama perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan dan organisasi mahasiswa. Beberapa organisasi yang sempat ditekuni penulis yaitu sebagai stafs Kementerian Perekonomian BEM ITS, Staff FSLDK JMMI ITS, Ketua Departemen Hubungan Luar HIMASIKA ITS, Ketua Hubungan Keluarga FOSIF Fisika ITS. Selain itu, penulis juga aktif dalam membantu penelitian-penelitian yang dilakukan oleh dosen, khususnya Bidang Minat Fisika Bumi. Penulis berkesempatan untuk bekerja praktik di BMKG mempelajari penentuan hiposenter gempa bumi di daerah maluku dan sekitarnya.